



Henni Jukkola

## **KEMIN KAIVOKSEN LÄMMÖNTARPEEN MÄÄRITTÄMINEN**

# **KEMIN KAIVOKSEN LÄMMÖNTARPEEN MÄÄRITTÄMINEN**

Henni Jukkola  
Opinnäytetyö  
Kevät 2018  
Energiatekniikan tutkinto-ohjelma  
Oulun ammattikorkeakoulu

# TIIVISTELMÄ

Oulun ammattikorkeakoulu  
Energiatekniikka

---

Tekijä: Henni Jukkola  
Opinnäytetyön nimi: Kemin kaivoksen lämmöntarpeen määrittäminen  
Työn ohjaaja: Veli-Matti Mäkelä  
Työn valmistumislukukausi ja -vuosi: Kevät 2018  
Sivumäärä: 50

---

Outokumpu Chrome Oy:n Kemin kaivoksen laajennuksen myötä lämpöenergiantarve kaivoksella lisääntyy. Nykyinen lämmöntuotantokapasiteetti ei riitä tulevaisuuden lämmöntarpeeseen, joten kaivokselle investoidaan uusi lämpökattila vuoden 2019 aikana. Työn tilaajana toimii Tornion Voima Oy, joka toimii Kemin kaivoksen lämmöntuottajana. Työn tavoitteena oli määrittää uuden kaukolämpöä tuottavan lämpökattilan teho. Lisäksi työn tavoitteena oli tarkastella kaukolämpöverkoston riittävyttä.

Opinnäytetyössä selvitettiin, minkä tehoinen kattila olisi kustannustehokkainta investoida. Kattilalaitoksesta pyydettiin alustavia tarjouksia eri toimittajilta. Tarjouksia pyydettiin 3 MW:n ja 4 MW:n kattilalaitoksista kustannusvertailun vuoksi. Budjettitarjouksia saatiin kuudelta eri toimittajalta. Tarjoukset esiteltiin toimeksiantajalle, joka käy kattilatoimittajien kanssa lopulliset neuvottelut investoinnista.

Kaukolämpöverkoston riittävyttä tutkittiin mitoituksen ja painehäviöiden avulla. Kaukolämpöverkoston mitoittamisen myötä selvisi, että nykyinen verkosto voi joissain osissa olla putkikooltaan liian pieni. Näissä verkoston osissa kaukolämpöveden virtausnopeudet kasvoivat. Lisäksi verkostolle tehtiin painehäviölaskenta.

Verkoston painehäviöitä tutkittiin myös kaukolämpöverkoston datan mukaan saadulla putkiston ominaiskäyrällä. Putkiston ominaiskäyrästä saatiin polynominen kaava, jolla laskettiin painehäviöt eri tehontarpeilla. Polynomisen kaavan mukaan saadut painehäviöt ovat luotettavampia, sillä kaava kuvasi paremmin putkiston ominaisuuksia. Painehäviölaskujen mukaan eräillä putkiston osilla täytyy tarkastella verkoston uusimista painehäviöiden nousun takia. Näin säästetään pumppauskustannuksissa.

---

Asiasanat: LNG, maakaasu, tulitorvi-tuliputkikattila, kuumavesikattila, kaukolämpöverkosto, kestävä kehitys

## ALKULAUSE

Tämä opinnäytetyö tehtiin Tornion Voima Oy:n toimeksiannosta. Haluan kiittää opinnäytetyöni ohjaajaa kehityspäällikkö Niko Rautiota sekä toimitusjohtaja Aki Hakulista mielenkiintoisesta ja ajankohtaisesta opinnäytetyön aiheesta. Lisäksi haluan kiittää kaikkia Tornion Voimalla työskenteleviä henkilöitä saamistani opeista sekä neuvoista. Haluan osoittaa kiitokseni myös ohjaavalle opettajalleni energiatekniikan yliopettaja Veli-Matti Mäkelälle. Lisäksi haluan osoittaa kiitokseni perheelleni heiltä saamastani tuesta.

11.4.2018

Henni Jukkola

# SISÄLLYS

TIIVISTELMÄ	3
ALKULAUSE	4
SISÄLLYS	5
1 JOHDANTO	6
2 TORNION VOIMA OY	7
3 NESTEYTETTY MAAKAASU	9
3.1 Maakaasun ominaisuudet	9
3.2 Maakaasun poltto	11
3.3 Päästöt	12
4 LÄMMÖNTARPEEN MÄÄRITTÄMINEN	14
4.1 Kaivoksen lämmöntarve ennen laajennusta	14
4.2 Kaivoksen lämmöntarve laajennuksen jälkeen	19
4.3 Investoitavan maakaasukattilan teho	25
5 TULITORVI-TULIPUTKIKATTILA	27
6 INVESTOITAVA MAAKAASUKATTILA	29
6.1 Budjettitarjouksen sisältö	29
6.1.1 Kattila ja poltin	29
6.1.2 Asennus	31
6.2 Savupiipun mitoitus	31
7 KAUKOLÄMPÖVERKOSTO	32
7.1 Kaukolämpöverkoston mitoitus	32
7.2 Putkiston ominaiskäyrä	35
7.3 Kaukolämpöverkoston siirtokyvyn tarkistus	38
8 YHTEENVETO	46
LÄHTEET	48

# 1 JOHDANTO

Outokumpu Chrome Oy:n Kemin kaivoksella tuotetaan kromimalmista tehtyjä malmirikasteita. Kaivos tarvitsee lämpöä maan päällisiin rakennuksiin sekä höyryä hienorikasteen kuivatukseen. Kaivoksella on kaksi lämpökattilaa kaukolämmön tuotantoon. Nämä ovat 2 MW:n kiinteän polttoaineen kattila eli KPA-kattila sekä 1,5 MW:n kevyen polttoöljyn kattila eli POK-kattila. Lisäksi höyryä tuotetaan omalla 1,4 MW:n POK-kattilalla. Kemin kaivoksen laajennuksen myötä lämpöenergian tarve kaivoksella lisääntyy. Nykyiset lämpökattilat eivät riitä lämmöntuotantoon, joten kaivokselle investoidaan uusi lämpökattila vuoden 2019 aikana.

Työn tilaajana toimii Tornion Voima Oy, joka toimii kaivoksen lämmöntuottajana. Työn tavoitteena on määrittää uuden lämpökattilan teho Outokumpu Chrome Oy:n Kemin kaivokselle. Polttoaineenaan kattila käyttää maakaasua Tornion Röyttään keväällä 2018 valmistuvan uuden LNG-terminaalin myötä. Kemin kaivokselle rakennetaan nesteytetyn maakaasun säiliö sekä höyrystimet. Lisäksi olemassa olevien öljykattiloiden polttimet vaihdetaan tulevaisuudessa maakaasulle sopiviksi.

Opinnäytetyössä selvitetään, minkä tehoinen kattila olisi kustannustehokkainta investoida. Kattilalaitoksesta pyydetään alustavia budjettitarjouksia, jotka esitellään toimeksiantajalle lopullisia neuvotteluja varten. Lisäksi työssä tarkistetaan nykyisen kaukolämpöverkoston riittävyys lämmöntarpeen noustessa. Kaukolämpöverkoston siirtokyky analysoidaan sekä tarvittavat uudet kaukolämpöputket mitoitetaan. Lisäksi verkoston suunnittelussa ja toimivuuden varmistamisessa tarvitaan painehäviölaskentaa.

## 2 TORNION VOIMA OY

Tornion Voima Oy on merkittävä Tornion alueen sähkön ja lämmön tuottaja. Sen omistaa EPV Energia Oy ja se on perustettu vuonna 2005. Tornion Voima Oy omistaa sähkön- ja lämmön yhteistuotantolaitoksen eli CHP-voimalaitoksen ja viisi varatehokattilaa, jotka sijaitsevat Outokumpu Tornio Worksin tehdasalueella. Lisäksi se omistaa lämpökattilalaitokset Pirkkiön kaupunginosassa ja Outokumpu Chrome Oy:n Kemin kaivoksella. CHP-voimalaitoksella tuotetaan yhteistuotantosähköä sekä lämpöenergiaa Outokumpu Tornio Worksin terästehtaalte ja Tornion kaukolämpöverkkoon. Polttoaineina CHP-voimalaitos käyttää jysinturvetta, biopolttoaineita sekä häkäkaasua. CHP-voimalaitos on valmistunut vuonna 2007. Kuvassa 1 on Tornion Voima Oy:n CHP-voimalaitos Outokumpu Tornio Worksin tehdasalueella. (1.)



*KUVA 1. Tornion Voima Oy:n CHP-voimalaitos (1)*

Varatehokattiloiden polttoainetta ollaan vaihtamassa tämän työn aikana raskaasta polttoöljystä maakaasuun. Lisäksi varatehokattiloissa poltetaan häkäkaasua. Varatehokattiloilla tuotetaan tarvittaessa lisäenergiaa Outokumpu Tornio Worksin terästehtaalte sekä varatehoa Tornion kaukolämpöverkkoon.

Pirkkiössä sijaitsevilla lämpökattiloilla tuotetaan lämpöenergiaa Tornion alueen kauko-lämpöverkkoon. Outokumpu Chrome Oy:n Kemin kaivoksella sijaitsevilla lämpökattiloilla tuotetaan kaukolämpöä kaivoksen tarpeisiin. Lisäksi yhdellä kattilalla tuotetaan höyryä kaivoksen tarpeisiin. (1.)

EPV Energia Oy on kotimainen energiayhtiö. EPV Energia tuottaa ja hankkii lämpöä ja sähköä omakustannusperiaatteella. Se tuottaa ja hankkii noin 5 % Suomessa käytetystä sähköstä. EPV Energia on perustettu vuonna 1952. Konsernilla on neljä eri liiketoiminta- aluetta, jotka ovat EPV Voima, EPV Lämpö, EPV Tuuli ja EPV Infra. Tornion Voima Oy kuuluu EPV Lämpö -liiketoiminta-alueeseen. (2.)



### **3 NESTEYTETTY MAAKAASU**

LNG (liquefied natural gas) on puhdistettua ja nesteytettyä maakaasua. Se on kirkas, väritön ja hajuton neste, joka koostuu pääasiassa metaanista. Lisäksi se sisältää pieniä määriä muita hiilivetyjä, kuten propaania, butaania ja etaania sekä inerttejä aineita kuten typpeä. Se on turvallinen ja ympäristöystävällinen energianlähde, joka soveltuu hyvin polttoaineeksi sekä kaasupohjaisen energian tuotantoon. (3, s. 3.)

Uusi lämpökattila käyttää polttoaineenaan maakaasua. Polttoaine on valittu uuden LNG-eli nesteytetyn maakaasun terminaalin valmistuttua Tornion Röyttän satamaan keväällä 2018. Outokumpu Chrome Oy:n Kemin kaivokselle rakennetaan LNG-säiliö, jonne nesteytettyä maakaasua tuodaan rekalla LNG-terminaalista. Lisäksi kaivokselle rakennetaan höyrystimet.

#### **3.1 Maakaasun ominaisuudet**

Laivalla tuodun maakaasun ominaisuudet voivat vaihdella alkuperämaan mukaan. Tässä työssä esitellään venäläisen maakaasun ominaisuudet.

Maakaasu korvaa yleensä öljyn käytön. Nestemäisiin ja kiinteisiin polttoaineisiin verrattuna maakaasulla on monia etuja, kuten hyvä palamishyötysuhde, helppo palamisen hallinta, laaja säätöalue, puhtaus sekä vähäiset rikki- ja typpioksidipäästöt (4, s. 51). Suomeen tuotava maakaasu on yleensä hyvin lähellä venäläisen maakaasun ominaisuuksia. Venäläinen maakaasu on noin 98-prosenttisesti metaania, kuten taulukosta 1 näkee.

TAULUKKO 1. Venäläisen maakaasun koostumus (5, s. 6)

Metaani CH <sub>4</sub>	98 %
Etaani C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	0,8 %
Propani C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	0,2 %
Butaani C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	0,02 %
Typpi N <sub>2</sub>	0,9 %
Hiilidioksidi CO <sub>2</sub>	0,1 %

Maakaasu on luonnonkaasu, jonka pääkomponentti on metaani. Se on rikitöntä eli savukaasut voidaan jäähdyttää alle vesikastepisteen, jolloin hyötysuhde paranee merkittävästi. Maakaasun tiheys on noin puolet ilman tiheydestä. Metaanin kiehumispiste on – 161,5 °C, jonka alle jäähdyttämällä maakaasu nesteytetään. Nesteytetyn maakaasun tilantarve on noin 1/600 kaasumaisen olomuodon vaatimasta tilavuudesta. Maakaasua kuljetettaessa ja varastoitaessa tällä on suuri merkitys. Taulukossa 2 on esitetty venäläisen maakaasun eli metaanipitoisuudeltaan 98-prosenttisen maakaasun ominaisuuksia. (5, s. 6–9.)

TAULUKKO 2. Venäläisen maakaasun ominaisuudet (5, s. 7–9, s. 12–13)

	Maakaasu
Tiheys, kaasu	0,72 kg/m <sup>3</sup>
Tehollinen lämpöarvo	36,0 MJ/m <sup>3</sup> n
	50,0 MJ/kg
	13,9 kWh/kg
	10,0 kWh/m <sup>3</sup> n
Ylempi lämpöarvo	39,8 MJ/m <sup>3</sup> n
	55,3 MJ/kg
Syttymislämpötila	600–650 °C
Syttymisalue	5–15 til-%
Kiehumispiste (atm)	–161,5 °C

Maakaasu on ilmaa kevyempää, joten se on helppo tuulettaa mahdollisissa vuotopaauksissa. Maakaasun syttymisrajat ovat 5–15 tilavuusprosenttia. Rajojen ulkopuolella seos on joko liian laiha tai liian rikas syttyäkseen. Syttymislämpötila maakaasulla on 600–650 °C, jonka yläpuolella maakaasu palaa seossuhteesta huolimatta. (4, s. 51.)

### 3.2 Maakaasun poltto

Maakaasu palaa sinisellä liekillä, joka valaisee heikosti. Kaasuliekki on vain heikosti säteilevä, sillä maakaasulta puuttuu vapaiden hiilipartikkeleiden aiheuttama liekkisäteily. Palamisprosessissa syntyy paljon vesihöyryä, minkä seurauksena kaasusäteily on esimerkiksi öljyn savukaasujen kaasusäteilyä voimakkaampaa. Kaasusäteilyn osuus on kuitenkin liekkisäteilyä selvästi pienempää. Kokonaissäteilyintensiteetti maakaasuliekillä

jää huomattavasti pienemmäksi kuin öljyliekin. (5, s. 21). Kuvassa 2 on Oilonin kaasupoltin, joka soveltuu maakaasulle. Kaasupoltin kuuluu ryhmään 3, joka on tehoalueeltaan 390–3500 kW. (6.)

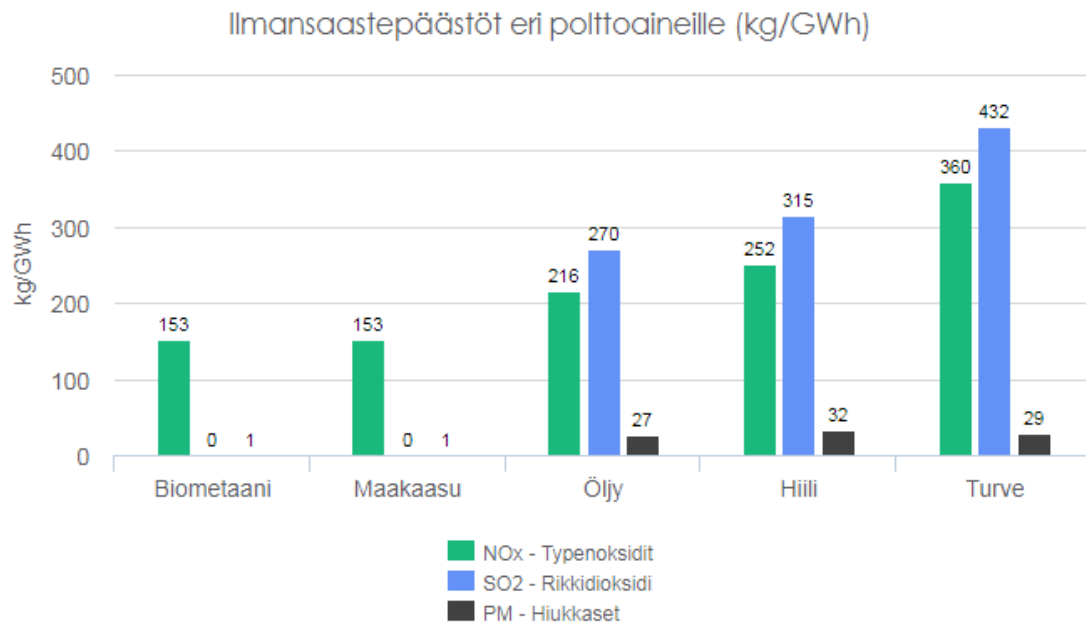


*KUVA 2. Kaasupoltin (6)*

Maakaasukattiloilla ei yleensä ole likaantumisongelmia (4, s.72). Maakaasuliekin säteilyominaisuuksien takia lämmönsiirto tulipesässä on 5–20 % pienempää kuin öljyä poltettaessa. Eroa pienentää hieman öljyn poltosta syntyvä noki, joka kerääntyy säteilypinnalle. Tulipesän loppulämpötila jää kuitenkin korkeammaksi maakaasua käytettäessä kuin öljyä käytettäessä. Lämmönsiirto maakaasukattiloissa tapahtuu konvektion kautta. Savukaasut voidaan jäähdyttää hyvin matalaan lämpötilaan esimerkiksi ekonomaisella eli syöttöveden esilämmittimen avulla. Savukaasujen jäähdyttämiseen vaikuttaa vesikastepiste. Happokastepistettä ei maakaasulla ole olemassa. (5, s. 21.)

### **3.3 Päästöt**

Merkittävä savukaasupäästö maakaasun poltossa on typenoksidit. Niitä muodostuu lähinnä palamisilman sisältämästä typestä, koska maakaasu ei sisällä orgaanisesti sitoutunutta typeä. Suurissa yli 40 MW:n kattiloissa on yleensä alhaisimmat NO<sub>x</sub>-päästöt ja pienissä alle 10 MW:n kattiloissa korkeimmat. Typenoksidipäästöt maakaasun poltossa riippuvat poltintyypistä, kattilan koosta sekä tulipesän mitoituksesta ja palamisolosuhteista. (4, s. 53, s. 86.) Kuvassa 3 on eri polttoaineille ilmansaastepäästöt yksikössä kg/GWh.



KUVA 3. Eri polttoaineiden typenoksidi-, rikkidioksidi- ja hiukkaspäästöt (7)

Kuvassa 3 on vertailtu biometaania, maakaasua, öljyä, hiiltä ja turvetta. Maakaasu on fossiilisista polttoaineista puhtain. Hiukkas- ja rikkidioksidipäästöjä maakaasun poltossa ei synny ollenkaan. Lisäksi sen hiilidioksidipäästöt ovat alhaisemmat kuin öljyn tai kivihiilen. (7.)

Pienten polttolaitosten kokoluokassa tehokkaita NO<sub>x</sub>-päästöjen rajoittamiskeinoja ovat esisekoitustyyppiset low-NO<sub>x</sub>-polttimet sekä savukaasujen kierrätys. Low-NO<sub>x</sub>-polttimissa palaminen tapahtuu kahdessa eri liekissä: alistökiömetrinen tyviliekki ja ylistökiömetrinen pääl liekki. Savukaasujen kierrätyksessä savukaasut kierrätetään takaisin palamisilmaan ja palamisilmaa vaiheistetaan. Näiden keinojen yhdistelmällä päästään parhaaseen tulokseen. Low-NO<sub>x</sub>-polttimia on asennettu lähes kaikkiin uusiin polttoaineteholtaan yli 5 MW:n maakaasukattiloihin. (4, s. 53.)

## 4 LÄMMÖNTARPEEN MÄÄRITTÄMINEN

Lämmöntarpeen määrittämiseksi tutkittiin kaukolämmön tehoja vuodelta 2016. Lisäksi tutkittiin kaukolämmön tehoja vuosilta 2015 ja 2017. Vuoden 2016 data on kerätty Exceliin, jossa datasta on saatu kuvaajia tehon käyttäytymisestä eri vuodenaikoina. Lisäksi tutkittiin POK-kattilan ja KPA-kattilan yksinään tuottamia kaukolämpötehoja. Datan perusteella on saatu arvio kaukolämmön huippukulutuksesta sekä energiankulutuksesta eri vuodenaikoina.

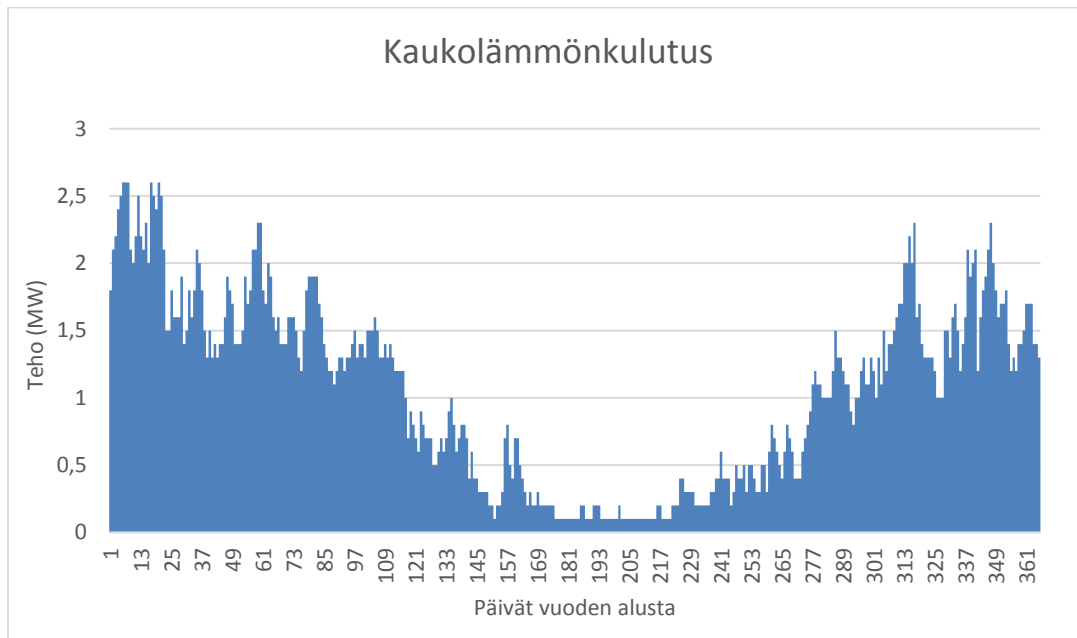
### 4.1 Kaivoksen lämmöntarve ennen laajennusta

Lämpölaitoksia Outokumpu Chromen Kemin kaivoksella on tällä hetkellä kaksi. Lämpölaitokset koostuvat kiinteään polttoaineen eli KPA-kattilasta sekä kevyen polttoöljyn eli POK-kattilasta. KPA-kattila on teholtaan 2 MW ja POK-kattila 1,5 MW. Lisäksi kaivoksella tuotetaan höyryä 1,4 MW:n POK-höyrykattilalla. KPA-kattilalla tuotetaan pelkästään kaukolämpöä kaivoksen kulutuksen mukaan. Kiinteään polttoaineen kattila käyttää polttoaineenaan haketta. Tyyppikilven mukaan KPA-kattilan maksimi veden ulostulolämpötila on 150 °C. Polttoaineen laadun on oltava hyvää niin kosteudeltaan kuin palakooltaan, jotta kattila toimii hyvin ja häiriöttömästi.

Kevyellä polttoöljyllä toimii kaukolämpöä tuottava kuumavesikattila sekä höyryä tuottava höyrykattila. Kuumavesikattilan poltin on tyypiltään Oilon RP-140 M. Kuumavesikattilan tilavuus on 4,6 m<sup>3</sup> ja käyttöpaine on 10 baaria. Kattilan suurin sallittu ulostulolämpötila on 120 °C. Höyrykattilan polttimeen malli on Oilonin RP-200 M ja se on teholtaan 1,4 MW. Höyrykattilan tilavuus on 4,68 m<sup>3</sup>, ja sen suurin sallittu käyttöpaine on 13 bar. Kattilan suurin sallittu lämpötila on 195 °C. Lämpötilat, paineet ja tilavuus on luettu kattiloiden tyyppikilvistä.

Kattiloita ajetaan niin, että talvella pääsääntöisesti kaukolämpöä tuotetaan KPA-kattilalla, ja POK-kuumavesikattila toimii varatehona. Talvella Kemin kaivos tarvitsee höyryä hienorikasteen kuivatukseen, joten POK-höyrykattila tuottaa höyryä pääsääntöisesti vain talvella. Kesällä kaukolämpöä pääasiassa käyttöveden lämmitykseen tuotetaan POK-kuumavesikattilalla.

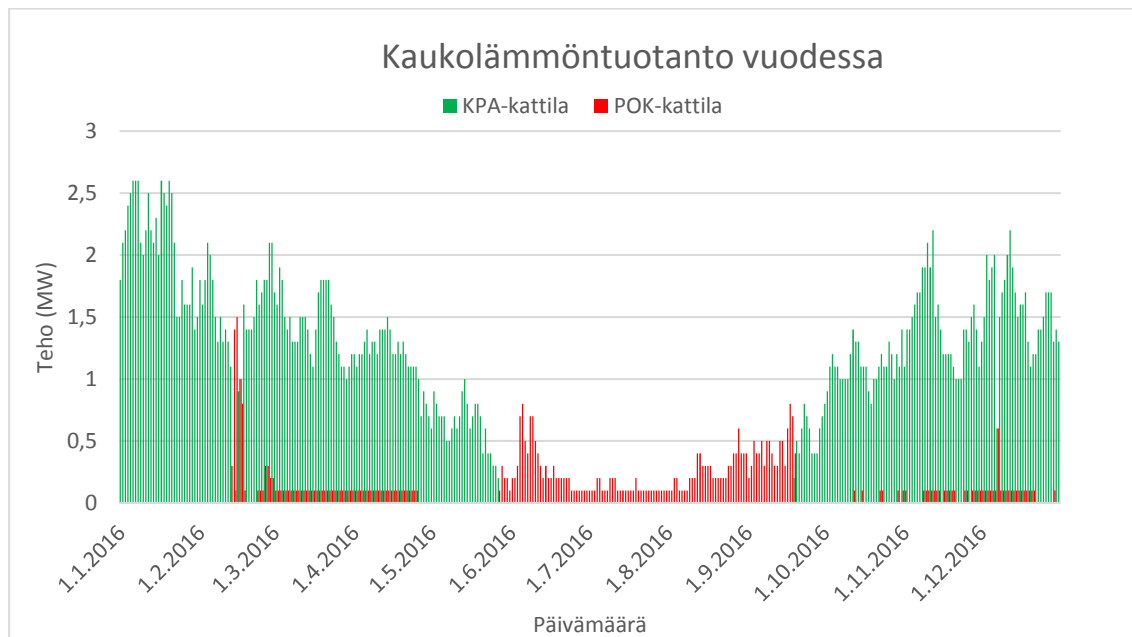
Tehontarpeiden määrittämiseksi työ aloitettiin tutkimalla vuoden 2016 tunti- ja päivädataa kaukolämmön kulutuksesta. Kuvassa 4 on kuvaaja kaukolämmön kulutuksesta vuodelta 2016. X-akselilla on päivät vuoden alusta ja y-akselilla päiväkohtainen keskiarvoteho.



*KUVA 4. Kaukolämmön kulutus vuonna 2016*

Kuvasta 4 näkee kaukolämmön kulutuksen olevan suurinta lokakuusta huhtikuuhun. Kesällä kaukolämmön kulutus johtuu pääasiassa lämpimän käyttöveden kulutuksesta.

Kuvassa 5 on kuvaaja, jossa näkyy kaukolämmöntuotanto KPA-kattilalla sekä POK-kattilalla. Dataa vuodelta 2016 analysoitaessa tuli ilmi, että talvisin myös POK-höyrykattila lämmittää kaukolämpöä höyrylämmönsiirtimessä. Höyrylämmönsiirrin on teholtaan 0,5 MW. Automaatiossa höyrylämmönsiirtimelle avautuva kaukolämpöveden venttiili avautuu, kun KPA-kattilan lämmittämä kaukolämmön menolämpötila ei nouse tarpeeksi korkealle. Rajalämpötila venttiilin avautumiselle höyrylämmönsiirtimelle on 95 °C.

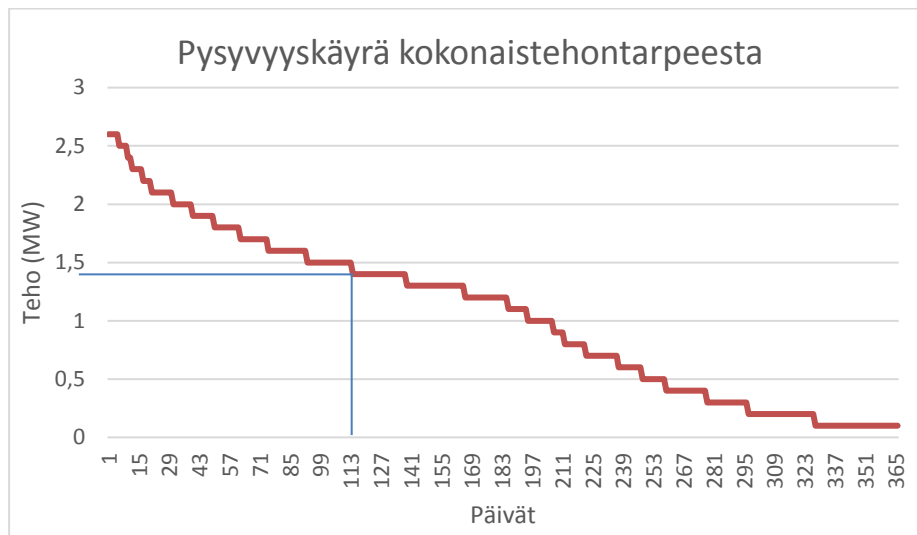


*KUVA 5. Kaukolämmöntuotanto vuoden 2016 aikana*

Lisäksi kuvan 5 kuvaajasta on huomattavissa kaksi korkeampaa piikkiä POK-kattilan tehossa talvella. Helmikuun puolessa välissä POK-kattilan kaukolämpöteho on ollut 1,5 MW ja joulukuussa 0,6 MW. Piikit POK-kattilan tehoissa talvella kertovat häiriöistä tai huoltotöistä KPA-kattilalla, jolloin KPA-kattila on ollut pois käytöstä.

POK- ja KPA-kattiloiden kaukolämpötehot laskettiin yhteen päiväkohtaisesti ja piirrettiin pysyvyyskäyrä. Kuvassa 6 on kuvaaja kokonaistehontarpeen pysyvyyskäyrästä. Pysyvyyskäyrä on tehty päiväkohtaisilla keskiarvotehoilla. Vuoden 2016 kaukolämmön huipputeho on ollut 2,6 MW ja minimiteho on ollut 0,1 MW. Yli 2 MW:n tehontarve on ollut vuodessa 39 päivänä.

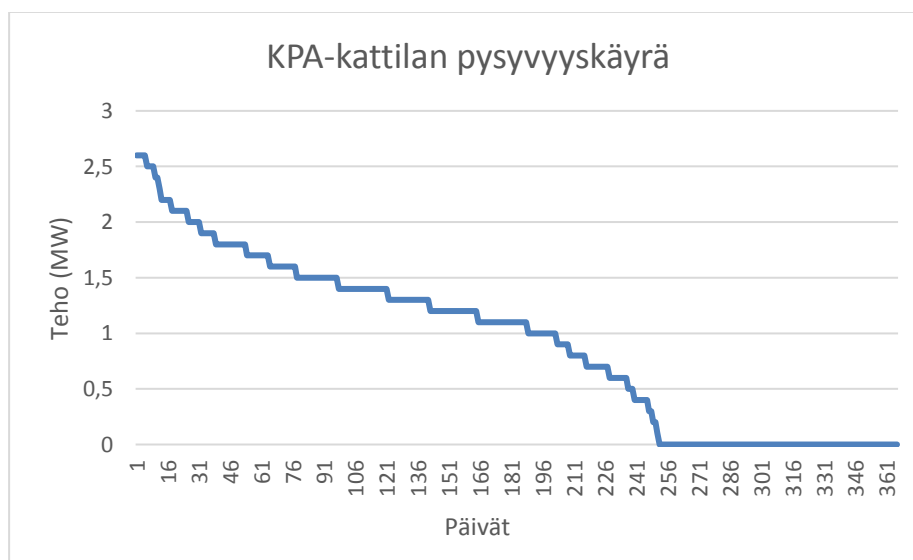




KUVA 6. Tehon pysyvyyskäyrä

Yleensä kaukolämmöntuotannossa huipunkäyttöaika on 2500–3000 h eli 104–125 päivää vuodessa (8, s. 32). Tämän mukaan kuvaajasta on nähtävissä, että kaukolämmön huipputehoalue on noin 1,4–2,6 MW. Kaukolämmöntehontarpeen keskiarvo kaivoksella on 1,05 MW.

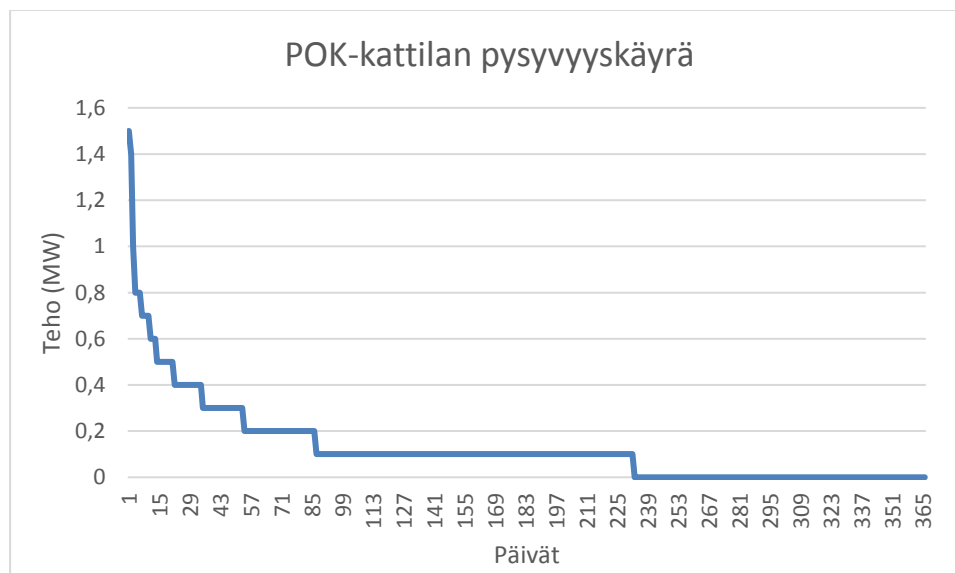
Kuvassa 7 on kuvaaja KPA-kattilan pysyvyyskäyrästä. Kuvasta nähdään KPA-kattilan käyttöpäivien vuoden aikana olleen 251 päivää. KPA-kattilan tehoksi on ilmoitettu 2 MW, mutta sillä on päästy 2,6 MW:n huipputehoon.



KUVA 7. KPA-kattilan pysyvyyskäyrä

Huipputehoon pääsy edellyttää polttoaineen hyvää laatua kosteudeltaan ja palakooltaan. Talvisin ongelmana on ollut polttoaineen joukkoon päässyt lumi, joka heikentää huomattavasti kattilasta saatavaa tehoa.

Kuvassa 8 on kuvaaja POK-lämpökattilan pysyvyyskäyrästä. Kuvaajan mukaan POK-lämpökattilaa on käytetty vuodessa 232 päivää. Pienellä 0,1 MW:n teholla POK-kattila on tuottanut kaukolämpöä 136 päivää vuodessa. Nämä pienet 0,1 MW:n tehot tulevat höyrylämmönsiirtimeltä, jossa höyrykattila lämmittää kaukolämpöä. POK-höyrykattilaa on käytetty 3047 h ja vesikattilaa 1026 h vuonna 2016 (9). Päiviksi muutettuna höyrykattilaa on käytetty 127 päivää. Vesikattilan käyttötunteja ei niinkään voi päiviksi muuttaa, sillä vesikattila on voinut olla käytössä päivän aikana muutaman tunnin. Vesikattila on aina käyttövalmiudessa, jos tehontarve nousee.



KUVA 8. POK-kattilan pysyvyyskäyrä

POK-kattilan kaukolämpötehoksi on ilmoitettu 1,5 MW. Kuvasta 8 nähdään kaukolämmön huipputehon olleen 1,5 MW. Huipputeho on saavutettu talvella helmikuun puolessa välissä KPA-kattilan ollessa kiinni huollon tai häiriön takia.

Kaukolämmön tehontarvetta tarkasteltiin myös vuodelta 2017. Datan perusteella huipputehontarve on ollut päivän tuntikohtaisilla keskiarvoilla 2,7 MW ja tuntikohtaisilla huipputehoilla 2,8 MW. Huipputehot on saavutettu tammikuussa ulkoilman lämpötilan ollessa  $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Vuoden 2017 dataa ei ole kerätty Excel-taulukkoon, vaan sitä on tarkasteltu

lämpökattiloiden prosessinohjausdatasta. Lisäksi tarkasteltiin myös vuoden 2015 kaukolämmön tehontarvetta. Silloin huipputehontarve on ollut alle 2,6 MW. Näin vuoden 2016 dataa voidaan pitää hyvänä keskiarvoisena lähteenä kaukolämmönkulutukselle. Lämmöntarpeen määrittämisessä huipputehona käytetään kuitenkin vuoden 2017 huipputehoa 2,8 MW:a.

#### **4.2 Kaivoksen lämmöntarve laajennuksen jälkeen**

Outokumpu Chrome Oy:n Kemin kaivoksen laajentumisen myötä lämpöenergian tarve kaivoksella kasvaa. Kaivokselle rakennetaan uusi nostotorni ja korjaamorakennus. Uuden nostotornin lämmitystehon tarpeeksi on arvioitu 2,0 MW (10). Uuden korjaamorakennuksen lämmitystehon tarpeeksi on arvioitu yhteensä 0,6 MW. Tämä muodostuu 100 kW:n tilalämmityksen tehontarpeesta sekä 500 kW:n ilmastoinnin lämmöntarpeesta (10).

Uusi korjaamorakennus on suunniteltu rakennettavaksi vanhaan korjaamorakennukseen kiinni. Lisäksi lämpötehontarve uudella korjaamolla on laskettu tässä työssä Suomen rakentamismääräyskokoelman ”Rakennuksen energiankulutuksen ja lämmitystehontarpeen laskenta” mukaisesti. Lämmitystehon tarpeeseen kuuluu johtumislämpöhäviöteho, vuotoilman lämpenemisen lämpötehontarve ja ilmanvaihtokoneen lämmityspatterin teho. Lisäksi tehontarpeeseen kuuluu käyttöveden lämmitystehontarve. Sisäisten lämmönlähteiden ja auringon säteilylämmön vaikutusta ei ole laskuissa otettu huomioon.

Kokonaisjohtumislämpöhäviöiden laskemiseksi täytyy laskea johtumislämpöteho jokaisen rakennusosan ja kylmäsiltojen läpi. Lämpöhäviötehot jokaisen rakennusosan läpi lasketaan kaavalla 1. Lämmönläpäisykerroin on määritetty materiaalin mukaan. Sisäilman lämpötilana on käytetty 17 °C:ta ja ulkoilman mitoituslämpötilana on käytetty –32 °C:ta. Ulkoilman mitoituslämpötila on valittu sijainnin mukaan Suomen rakentamismääräyskokoelman D3 liitteestä 3. Kemi kuuluu säävyöhykkeelle 3. Lämmönläpäisykertoimenä ulkoseinälle on käytetty arvoa 0,16 W/m<sup>2</sup>K ja yläpohjalle arvoa 0,09 W/m<sup>2</sup>K (11). Lämmönläpäisykertoimet alapohjalle, ikkunoille ja oville on saatu Suomen rakentamismääräyskokoelman osasta D3. Alapohjan lämmönläpäisykertoimenä on käytetty arvoa

0,17 W/m<sup>2</sup>K ja ikkunoiden ja ovien arvoa 1 W/m<sup>2</sup>K (12, s. 13). Kaavalla 1 saatiin johtumislämpötehoksi kaikkien rakennusosien läpi yhteensä 23,5 kW.

$$\phi_i = \sum U_i A_i (T_s - T_{u, mitt}) \quad \text{KAAVA 1}$$

$\phi_i$  = johtumislämpöteho rakennusosan i läpi (W)

$U_i$  = lämmönläpäisykerroin (W/m<sup>2</sup>K)

$A_i$  = rakennusosan vaipan pinta-ala (m<sup>2</sup>)

$T_s$  = sisäilman lämpötila (°C)

$T_{u, mitt}$  = ulkoilman mitoitustilalämpötila (°C)

Johtumislämpöteho kylmäsiltojen läpi lasketaan kaavalla 2. Viivamaisen kylmäsilan pituus on laskettu korjaamorakennuksen piirustuksista. Lisäkonduktanssina ulkoseinien välisille liitoksille on käytetty betonin arvoa 0,06 W/mK, yläpohjalle betonin arvoa 0,08 W/m K, alapohjalle maata vasten olevan betonin arvoa 0,24 W/mK sekä oville ja ikkunoille arvoa 0,04 W/mK (13, s. 19). Kaavalla 2 saatiin johtumislämpötehoksi kylmäsiltojen läpi yhteensä 2,6 kW.

$$\phi_{kylmäsilat} = \sum l_k \Psi_k (T_s - T_{u, mitt}) \quad \text{KAAVA 2}$$

$\phi_{kylmäsilat}$  = johtumislämpöteho kylmäsiltojen läpi (W)

$l_k$  = viivamaisen kylmäsilan pituus (m)

$\Psi_k$  = viivamaisen kylmäsilan lisäkonduktanssi (W/m K)

$T_s$  = sisäilman lämpötila (°C)

$T_{u, mitt}$  = ulkoilman mitoitustilalämpötila (°C)

Koko rakennusvaipan johtumislämpöteho voidaan nyt laskea kaavalla 3. Kokonaisjohtumislämpötehoksi saatiin 26,0 kW.

$$\phi_{joht} = \phi_{ulkoseinä} + \phi_{yläpohja} + \phi_{alapohja} + \phi_{ikkunat\ ja\ ovet} + \phi_{kylmäsilat} \quad \text{KAAVA 3}$$

$\phi_{joht}$  = johtumislämpöteho koko rakennusvaipan läpi (W)

$\phi_{ulkoseinä}$  = johtumislämpöteho ulkoseinien läpi (W)

$\phi_{yläpohja}$  = johtumislämpöteho yläpohjien läpi (W)

$\phi_{alapohja}$  = johtumislämpöteho alapohjien läpi (W)

$\phi_{ikkuna}$  = johtumislämpöteho ikkunoiden läpi (W)

$\phi_{ovi}$  = johtumislämpöteho ulko-ovien läpi (W)

$\phi_{kylmäsillat}$  = johtumislämpöteho kylmäsiltojen läpi (W)

Vuotoilman lämpenemisen lämpötehontarpeen laskemiseksi selvitetään ensin vuotoilmavirta. Rakennusvaipan ilmanvuotolukuna käytetään arvoa  $4 \text{ m}^3/(\text{h m}^2)$ . Vuotoilmavirta lasketaan kaavalla 4. Kaavassa  $x$  on kerroin, jonka arvona laskuissa käytetään 20:tä (13, s. 21). Kaavalla 4 vuotoilmavirraksi saatiin  $0,22 \text{ m}^3/\text{s}$ .

$$q_{v,vuotoilma} = \frac{q_{50}}{3600 \cdot x} A_{vaippa} \quad \text{KAAVA 4}$$

$q_{v,vuotoilma}$  = vuotoilmavirta ( $\text{m}^3/\text{s}$ )

$q_{50}$  = rakennusvaipan ilmanvuotoluku ( $\text{m}^3/\text{h m}^2$ )

$A_{vaippa}$  = rakennusvaipan pinta-ala ( $\text{m}^2$ )

$x$  = kerroin, joka on kolmi- ja nelikerroksisille 20

Lämpötehontarve vuotoilman lämpenemiselle lasketaan kaavalla 5. Kaavalla 5 vastaukseksi saatiin 12,8 kW.

$$\phi_{vuotoilma} = \rho_i c_{pi} q_{v,vuotoilma} (T_s - T_{u,mitt}) \quad \text{KAAVA 5}$$

$\phi_{vuotoilma}$  = lämpötehon tarve vuotoilman lämpenemiseen (W)

$\rho_i$  = ilman tiheys,  $1,2 \text{ kg}/\text{m}^3$

$c_{pi}$  = ilman ominaislämpökapasiteetti,  $1000 \text{ J}/\text{kg K}$

$q_{v,vuotoilma}$  = vuotoilmavirta ( $\text{m}^3/\text{s}$ )

$T_s$  = sisäilman lämpötila ( $^{\circ}\text{C}$ )

$T_{u,mitt}$  = ulkoilman mitoitustilalämpötila ( $^{\circ}\text{C}$ )

Tuloilman lämpenemisen lämpötehontarve lasketaan kaavalla 6. Tuloilmavirtana on käytetty arvoa  $5,5 \text{ m}^3/\text{s}$  (10). Sisäänpuhallustilalämpötilana on käytetty arvoa  $15^{\circ}\text{C}$ . Tuloilman lämpenemisen lämpötehontarpeeksi saatiin 13,2 kW.

$$\phi_{tuloilma} = \rho_i c_{pi} q_{v,tulo} (T_s - T_{sp}) \quad \text{KAAVA 6}$$

$\phi_{tuloilma}$  = tuloilman lämpenemisen lämpötehontarve tilassa (W)

$\rho_i$  = ilman tiheys,  $1,2 \text{ kg}/\text{m}^3$

$c_{pi}$  = ilman ominaislämpökapasiteetti,  $1000 \text{ J}/\text{kg K}$

$q_{v,tulo}$  = tuloilmavirta ( $m^3/s$ )

$T_s$  = sisäilman lämpötila ( $^{\circ}C$ )

$T_{sp}$  = sisäänpuhalluslämpötila ( $^{\circ}C$ )

Lämpötehontarve tilojen lämmitykseen lasketaan lisäämällä johtumislämpöhäviöt, vuotoilman ja tuloilman lämmittämiseen tarvittavat lämpötehot yhteen kaavan 7 mukaisesti. Korvausilman tarvetta rakennuksessa ei ole, sillä poistoilman määrä on sama kuin tuloilman määrä. Kaavalla 7 vastaukseksi saatiin 52 kW.

$$\Phi_{tila} = \Phi_{joht} + \Phi_{vuotoilma} + \Phi_{tuloilma} + \Phi_{korvausilma} \quad \text{KAAVA 7}$$

$\Phi_{tila}$  = lämmitysjärjestelmän lämpötehon tarve tilassa (W)

$\Phi_{joht}$  = johtumislämpöhäviöt (W)

$\Phi_{vuotoilma}$  = vuotoilman lämpenemiseen tarvittava lämpöteho (W)

$\Phi_{tuloilma}$  = teho tuloilman lämmittämiseen (W)

$\Phi_{korvausilma}$  = teho korvausilman lämmittämiseen (W)

Neuvottelutilojen, toimistojen, sähkötilan ja taukotilan poistoilmaan suunnitellaan laitettavaksi lämmöntalteenotto. Lämmöntalteenotossa käytetyn poistoilmavirran suuruus on  $1,5 m^3/s$ . Vuosihyötysuhde lämmöntalteenotolle saatiin Suomen Rakentamismääräyskokoelman LTO-laskimella, jossa tuloilman lämpötilasuhteena käytettiin arvoa 75,3 %. (11.) Vuosihyötysuhde säävyöhykkeellä 3 on 70 %. Korjaamon jäteilmaa, kuten maa- ja hitsaustilojen poistoilmaa, ei voida käyttää lämmöntalteenotossa sen huonosta laadusta johtuen. Lämmöntalteenoton jälkeinen tuloilman lämpötila lasketaan kaavalla 8. Tuloilman lämpötilaksi saatiin  $2,3^{\circ}C$ .

$$T_{lto,mitt} = T_{u,mitt} + \eta_{t,mitt}(T_s - T_{u,mitt}) \quad \text{KAAVA 8}$$

$T_{lto,mitt}$  = lämmöntalteenoton jälkeinen tuloilman lämpötila mitoitusilanteessa ( $^{\circ}C$ )

$T_{u,mitt}$  = ulkoilman mitoituslämpötila ( $^{\circ}C$ )

$\eta_{t,mitt}$  = vuosihyötysuhde

$T_s$  = sisäilman lämpötila ( $^{\circ}C$ )

Kaavalla 9 laskettiin ilmanvaihdon lämmityspatterin teho lämmöntalteenoton läpi menevälle ilmavirralle. Sisäänpuhalluslämpötilana käytettiin arvoa  $15^{\circ}C$ . Kaavalla 9 vastaukseksi saatiin 22,9 kW.

$$\dot{\Phi}_{iv} = \rho_i c_{pi} q_{v,tulo} (T_{sp} - T_{lto, mitt})$$

KAAVA 9

$\dot{\Phi}_{iv}$  = ilmanvaihtopatterin lämpötehon tarve (W)

$\rho_i$  = ilman tiheys, 1,2 kg/m<sup>3</sup>

$c_{pi}$  = ilman ominaislämpökapasiteetti, 1000 J/kg K

$q_{v,tulo}$  = tuloilmavirta (m<sup>3</sup>/s)

$T_{sp}$  = sisäänpuhalluslämpötila (°C)

$T_{lto, mitt}$  = lämmöntalteenoton jälkeinen tuloilman lämpötila mitoituslämpötila (°C)

Ilmanvaihtokoneen lämmityspatterin teho tuloilmavirralla, jonka lämmityksessä ei voida hyödyntää lämmöntalteenottoa, lasketaan samalla kaavalla 9. Lämmöntalteenoton jälkeisenä tuloilman lämpötilana käytetään tuloilman mitoituslämpötilaa -32 °C:ta. Tuloilmavirtana käytetään arvoa 4 m<sup>3</sup>/s, joka on saatu vähentämällä arvosta 5,5 m<sup>3</sup>/s lämmöntalteenoton läpi menevä tuloilmavirta 1,5 m<sup>3</sup>/s. Kaavalla 9 ilmanvaihtokoneen lämmityspatterin tehoksi saadaan 225,6 kW.

Lämpötehon tarve käyttöveden lämmitykseen on mitoitettu suosituksen K15/1998 mukaan. Mitoitusvesivirtaama lämpimälle käyttövedelle on mitoitettu Rakentamismääräyskokoelman osan D1 mukaan. Uuteen korjaamorakennukseen tulee piirustusten mukaan neljä pesuallasta sekä pesuhalliin neljä laskuhanaa. Yhden pesualtaan normivirtaama on 0,1 dm<sup>3</sup>/s ja yhden laskuhanan normivirtaama on 0,2 dm<sup>3</sup>/s. Normivirtaamien summa on 1,2 dm<sup>3</sup>/s. Tämän perusteella mitoitusvirtaamaksi on saatu 0,47 dm<sup>3</sup>/s (15, s. 35–37). Käyttöveden tuntiseksi tehontarpeeksi kattilan mitoituksen kannalta saatiin 16,5 kW (16, liite 1). Hetkelliseksi tehoksi eli lämmönsiirtimen tehoksi käyttövedelle saatiin kaavan 10 mukaisesti laskemalla 99 kW.

$$\dot{\Phi}_{lkv} = \rho_v c_{pv} q_{v, lkv} (T_{lkv} - T_{kv})$$

KAAVA 10

$\dot{\Phi}_{lkv}$  = käyttöveden lämmitysjärjestelmän lämpötehon tarve (W)

$\rho_v$  = veden tiheys (1000 J/kg K)

$c_{pv}$  = veden ominaislämpökapasiteetti (4200 J/kg K)

$q_{v, lkv}$  = lämpimän käyttöveden mitoitusvirtaama (0,00047 m<sup>3</sup>/s)

$T_{lkv} - T_{kv}$  = lämpimän ja kylmän käyttöveden lämpötilaero 50 °C (13, s. 70)

Kokonaislämmitysteho lasketaan kaavalla 11. Tilalämmitysjärjestelmän, ilmanvaihdon ja käyttöveden lämmitysjärjestelmien hyötysuhteina on käytetty arvoa 0,9 (13, s. 65). Kaavalla 11 rakennuksen lämmitystehontarpeeksi saadaan 444 kW.

$$\Phi_{\text{lämmitys}} = \frac{\Phi_{\text{tila}}}{\eta_{\text{tilalämmitys}}} + \frac{\Phi_{\text{iv}}}{\eta_{\text{iv}}} + \frac{\Phi_{\text{lkv}}}{\eta_{\text{lkv}}} \quad \text{KAAVA 11}$$

$\Phi_{\text{lämmitys}}$  = rakennuksen lämmitystehon tarve (W)

$\Phi_{\text{tila}}$  = tilojen lämmitysjärjestelmän lämpötehon tarve (W)

$\Phi_{\text{iv}}$  = ilmanvaihdon tuloilman lämmitysjärjestelmän lämpötehon tarve (W)

$\Phi_{\text{lkv}}$  = käyttöveden lämmitysjärjestelmän lämpötehon tarve (W)

$\eta_{\text{tilalämmitys}}$  = tilalämmitysjärjestelmän hyötysuhde mitoitusolosuhteissa, 0,9

$\eta_{\text{iv}}$  = ilmanvaihdon lämmitysjärjestelmän hyötysuhde mitoitusolosuhteissa, 0,9

$\eta_{\text{lkv}}$  = käyttöveden lämmitysjärjestelmän hyötysuhde mitoitusolosuhteissa, 0,9

Laskujen perusteella korjaamon kokonaislämmitystehon tarpeeksi saadaan yhteensä 444 kW. Lämmitystehontarve sisältää tilalämmityksen, ilmanvaihdon sekä lämpimän käyttöveden. Laskettu lämmitystehontarve eroaa Kemin kaivoksen konsultin saamasta 600 kW:sta. Ilmanvaihdon lämmitystehon tarpeeksi Kemin kaivoksen konsultti on arvioinut 500 kW. Laskujen perusteella ilmanvaihdon lämmitystehontarve on 249 kW. Kun ilmanvaihdon lämmitystehontarpeessa otetaan huomioon hyötysuhde 90 %, saadaan tehontarpeeksi 276 kW. Ilmanvaihdon lämmitystehontarve eroaa Kemin kaivoksen konsultin saamasta 500 kW:sta. Lämmityksen tehontarpeeksi Kemin kaivoksen konsultti on arvioinut 100 kW. Laskujen perusteella lämmityksen tehontarve on tilalämmityksen tehontarve 52 kW ja lämpimän käyttöveden tuntinen tehontarve 16,5 kW eli yhteensä 69 kW. Tämäkin eroaa hieman Kemin kaivoksen konsultin saamasta 100 kW:n lämmitystehon tarpeesta. Työssä laskemalla saadut tehontarpeet ovat pienemmät kuin Kemin kaivoksen konsultin ilmoittamat. Ilmanvaihdon lämmitystehontarpeen laskut voidaan tässä työssä ajatella suuntaa antaviksi, sillä tarkkoja tietoja eri huoneiden ilmavirroista ei ollut. Kattilan tehontarpeen määrittämisessä käytettiin Kemin kaivoksen konsultin ilmoittamia tehontarpeita.



### 4.3 Investoitavan maakaasukattilan teho

Tällä hetkellä tunnettu kaukolämmönhuipputeho on 2,8 MW. Nostotornin lämmöntarve on 2,0 MW ja uuden korjaamorakennuksen 0,6 MW. Nostotornille ja uudelle korjaamolle arvioidaan kaukolämpöverkostön häviöt. Häviöiden arvioidaan olevan 10 %, sillä verkosto on melko pieni pituuksiltaan. Verkoston lämpöhäviöiksi saadaan 0,3 MW kaavalla 12.

$$(2,0 \text{ MW} + 0,6 \text{ MW}) * 0,10$$

KAAVA 12

Laajennuksen jälkeiseksi huippulämpötehontarpeeksi saadaan 5,7 MW kaavalla 13.

$$2,8 \text{ MW} + 2,0 \text{ MW} + 0,6 \text{ MW} + 0,3 \text{ MW}$$

KAAVA 13

Uuden maakaasukattilan tehon määrittämiseksi mietittiin kaukolämmöntuotannon ajotapoja tulevaisuudessa. Lisäksi tehon määrittämisessä otettiin huomioon, jos lämpötehtarve nousee edelleen vielä tulevaisuudessa investoinnin jälkeen. Taulukossa 3 on esitetty kaksi eri vaihtoehtoa tehoa uudelle maakaasukattilalle. Tehot on laskettu vähentämällä kokonaistehontarpeesta eli 5,7 MW:sta KPA-kattilan ja POK-lämpökattilan tuottamat tehot.

TAULUKKO 3. Uuden maakaasukattilan teho

Huipputehon aikaan päällä olevat kattilat	Uuden maakaasukattilan teho (MW)
KPA (2MW) + POK (1,5MW) + maakaasu	2,2
KPA (2 MW) + maakaasu	3,7

Todellisuudessa KPA-kattilasta on saatu ulos tehoa jopa 2,8 MW. Tämä vaatii kuitenkin polttoaineen erittäin hyvää laatua. Taulukon 3 laskuissa KPA-kattilan tehona on käytetty sen ilmoittamaa 2 MW:n tehoa. KPA-kattila on päällä aina talvisin, joten se toimii talvella perustehokattilana. Jos KPA-kattilan teho ei riitä, käynnistetään seuraavana POK- tai maakaasukattila. Jos talvella ajetaan KPA-kattilalla, POK-kattilalla ja maakaasukattilalla kaikilla samanaikaisesti, uuden maakaasukattilan tehoksi riittää 2,2 MW. Jos POK-

kattila jätetään täysin kesäaikaiseen käyttöön sekä varatehokattilaksi, uuden maakaasukattilan tehon täytyisi olla 3,7 MW.

Investoitavasta maakaasukattilasta päätettiin pyytää tarjoukset 3 MW:n ja 4 MW:n kattiloista. Kemin kaivokselle investoidaan yksi kattila, mutta budjettitarjoukset pyydettiin kahdesta kustannusvertailun vuoksi.

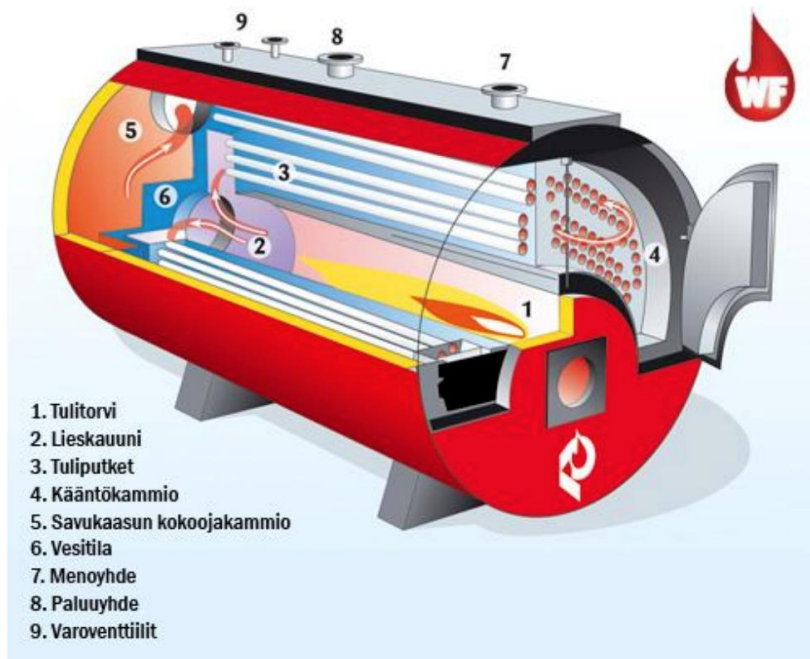
Investoitavan maakaasukattilan tehossa päädyttiin 4 MW:n kattilalaitokseen, sillä kustannuksiltaan suurempitehoinen kattilalaitos ei ollut huomattavasti kalliimpi verrattuna 3 MW:n kattilalaitokseen. KPA-kattila ja 4 MW:n maakaasukattila yhdessä riittävät lämmöntuotantoon talven huipputehojen aikaan. Öljykattiloiden polttimet vaihdetaan maakaasulle sopiviksi vuoden 2019 aikana, joten 1,5 MW:n POK-kattila käyttää tässä vaiheessa polttoaineenaan maakaasua. Jos KPA-kattilalla tulee talven huipputehojen aikaan häiriö, 4 MW:n ja 1,5 MW:n maakaasukattilat riittävät tuottamaan lämpötehoa yhteensä 5,5 MW. Lisäksi 0,5 MW:n höyrylämmönsiirrin auttaa lämmöntuotannossa. Näin kattilat riittävät lämmöntuotantoon, vaikka KPA-kattila olisi pois käytöstä. Lisäksi lämmöntarpeen nousuun jää hieman varaa mahdollisia lisälaajennuksia varten.

## 5 TULITORVI-TULIPUTKIKATTILA

Kaivokselle investoitava uusi lämpökattila on kuumavesikattila, joka on tyypiltään tulitorvi-tuliputkikattila. Se sopii kohteeseen tyypiltään ja teholtaan. Tulitorvi-tuliputkikattiloita käytetään höyryn sekä kaukolämmön tuotannossa. Kuuma- ja lämminvesikattilat tuottavat lämmitettyä vettä kuluttajan tarpeisiin.

Tulitorvi-tuliputkikattilat kuuluvat suurvesikattiloihin. Ne ovat yleensä öljy- tai kaasulämmitteisiä. Suurvesikattiloissa savukaasut kulkevat ensin tulitorvessa ja sen jälkeen tuliputkissa. Vesi lämpenee tuliputkien ulkopuolella eikä se missään vaiheessa höyrysty. Kattila toimii samalla myös varaajana, sillä vesitila on hyvin suuri polttotehoon nähden. (4, s. 22; 17, s. 7.)

Polttoaine palaa tulitorvessa, jonka jälkeen on kääntökammio. Kääntökammioista savukaasut jatkavat matkaa tuliputkiin. Kolmivetoisessa kattilassa etuosassa on jälleen kääntökammio, jossa savukaasut vaihtavat virtaussuuntaa ja virtaavat uudestaan tuliputkia pitkin vesitilan läpi kattilan peräpäähän. Kattilan peräpäästä jäähtyneet savukaasut johdetaan savupiippuun. Tuliputkien ja tulitorven ulkopuolinen pinta on täysin veden peitossa. Lämpö kulkee seinämän läpi ja lämmittää vettä. Alimmaisena vesitilassa sijaitsee tulitorvi ja tuliputket sen yläpuolella. Savukanavaan on mahdollista sijoittaa syöttöveden esilämmitin ja näin parantaa hyötysuhdetta. (18, s. 112.) Kuvassa 9 on esitetty tulitorvi-tuliputkikattilan rakenne.



KUVA 9. Tulitorvi-tuliputki kattilan rakenne (19)

Kattilan suunnittelun lähtökohtana on, että tulipesään kohdistuvat lämpökuormat ja savukaasujen nopeudet lämmönsiirto-osassa ovat pieniä. Tämä edesauttaa täydellistä palamista sekä NO<sub>x</sub>-päästöjen minimoitumista. Lisäksi kattilan painehäviöt ovat matalat. (20.)

Kattilan rakenteesta johtuen höyryn paineen kasvaessa tarvitaan kattilassa vesi- ja höyrytilaa rajoittavissa painekuorissa ja tulitorvissa paksummat seinämät. Tämä nostaa kattilan hintaa niin, että edullisemmaksi käy vesiputkirakenne. Vesiputkirakenteessa vesi höyrystyy ulkopuolelta lämmitettävissä putkissa. Kattilan höyryntuotannon lisäämisellä on samansuuntainen vaikutus. Tehon lisääminen vaatii kasvattamaan lämpöpintoja, mikä edellyttää kattilan suurentamista ja paineenalaisten osien seinämien paksuntamista. Yleensä suurvesikattiloita ei käytetä yli 20 bar:n paineissa. Kattiloiden teho on yleensä alle 12 MW. (18, s. 112.)

## **6 INVESTOITAVA MAAKAASUKATTILA**

Investoitavasta maakaasukattilalaitoksesta pyydettiin kahdeksalta eri toimittajalta alustavat budjettitarjoukset. Budjettitarjouksia saatiin kuusi kappaletta. Opinnäytetyön toimeksiantaja käy lopulliset neuvottelut kattilatoimittajan kanssa. Budjettitarjouksiin pyydettiin sisältämään koko laitoksen eri komponentit, kuten kattila ja poltin putkistoineen ja varusteineen, toimituskulut Outokumpu Chrome Oy:n Kemin kaivokselle sekä kattilarakennus ja savupiippu. Tarjouksessa pyydettiin optioina esittämään teknisiä ratkaisuja, kuten ekonomaiseri, paremman hyötysuhteen saavuttamiseksi.

### **6.1 Budjettitarjouksen sisältö**

Saadut kattilalaitostarjoukset sisältävät kattilan ja polttimeen komponentteineen, suunnittelun ja teknisen dokumentaation sekä tekniset palvelut. Kattilalaitoskokonaisuus sisältää teräsrakenteisen kattilalaitosrakennuksen, joka on pituudeltaan noin kymmenen metriä sekä leveydeltään ja korkeudeltaan noin neljä metriä. Savupiippu on 1-horminen ja korkeudeltaan 22 metriä. Kattilalaitos sisältää myös lämmitys- ja tuuletuslaitteet. Tarjoukseen kuuluu kattilalaitoksen prosessi- ja laitesuunnittelu sekä tekninen- ja painelaitedokumentaatio. Lisäksi tarjoukseen sisältyy toimitettavien laitteiden käyttö- ja huolto-ohjeet. (23.)

#### **6.1.1 Kattila ja poltin**

Kuumavesikattila on tulitorvi-tuliputkikattila. Taulukossa 4 on esitetty 4 MW:n kuumavesikattilan tekniset tiedot.

TAULUKKO 4. Kuumavesikattilan tekniset tiedot (23)

Kattilateho	4 MW
Suunnittelupaine	16 bar
Suunnittelulämpötila	184 °C
Kattilan menoveden/paluuveden lämpötila	115 °C / 80 °C
Savukaasujen lämpötila kattilan jälkeen	150 – 215 °C
Palamishyötysuhde	50 %:n teholla: 92,7 % 100 %:n teholla: 90,8 %
Hyötysuhde ekonomaiserein kanssa	≥ 94 %
Palamisilman lämpötila	25 °C

Ekonomaiserein kanssa palamishyötysuhde 50 %:n teholla nousee 1,3 %. 100 %:n teholla palamishyötysuhde nousee jo 3,2 %. Suurilla tehoilla ekonomaisierista hyöttyy enemmän. Yleisesti kaasukattilan hyötysuhde on kuitenkin hyvä. Savukaasujen lämpötila on vähintään 150 °C. Täydellä teholla savukaasujen lämpötila on enintään 215 °C. Puolella teholla savukaasujen lämpötila on enintään 170 °C. (23.)

Kattilan vesitilavuus on 8,6 m<sup>3</sup> ja tulipesän tilavuus 4,8 m<sup>3</sup>. Säteilytulipinta on 18,7 m<sup>2</sup>, konvektiotulipinta 92,7 m<sup>2</sup> ja kokonaistulipinta 111,4 m<sup>2</sup>. Savukaasupuolen painehäviö on 800 Pa ja kattilan vesipuolen 4500 Pa. Kattilan lämpöeristyksessä käytetään mineraalivillaa. (23.)

Tarjouksen maakaasupoltin on moduloivasäätöinen ja merkiltään Oilon GP-350 M. Polttimen tehoalue on 700–4250 kW ja säätösuhde 1:6 (24).

Tarjous sisältää myös kaksi kaukolämpöpumppua sekä yhden sekoituspumpun. Lisäksi tarjoukseen kuuluu putkistot varusteineen, putkistoeristykset sekä paineenpitojärjestelmä. Paineenpitojärjestelmä sisältää paineenpitopumpun sekä kahden kuution paisuntasäiliön. Kattilalaitokseen kuuluu pääsähkökeskus sähköasennusmateriaaleineen, joita ovat esimerkiksi kaapelit ja hyllyt. Lisäksi kattilalaitokseen kuuluu automaatiokeskus, taajuusmuuttajat ja instrumentoinnin kenttälaitteet. (23.)

### **6.1.2 Asennus**

Kattilalaitos asennetaan rakennusmoduuliin konepajalla. Lisäksi kattilalaitokseen tehdään tarkastukset konepajalla. Kattilalaitosmoduuli ja savupiippu kuljetetaan käyttöpäikalle ja asennetaan perustuksille. Tarjoukseen kuuluu kattilaitoksen käyttöönotto sekä henkilökunnan koulutus. (23.)

Tarjoushinta ei sisällä kattilalaitoksen maanrakennus- ja perustustöitä eikä myöskään laitoksen ulkopuolisia verkostoja. Tarjoukseen ei kuulu lupa- ja tarkastusmaksuja asennuspaikalla. (23.)

### **6.2 Savupiipun mitoitus**

Tässä työssä piipun korkeus arvioitiin Ilmatieteen laitoksen tekemän ”Piipunkorkeuden mitoitus 1–5 MW energiantuotantoyksiköissä” mukaan. Maakaasua polttavan kattilalaitoksen piipun korkeuden tulee olla tasaisessa maastossa vähintään viisi metriä tai vähintään 1,5-kertaa laitosrakennuksen korkeus. Lisäksi piipun korkeuteen vaikuttavat 300 metrin säteellä laitoksesta olevat maanpinnan korkeuden vaihtelut tai rakennukset (21, s.11). Vanhan nostotornin korkeus on 70 metriä (22) sekä lisäksi kaivosalueella on halleja ja rakennuksia korkeudeltaan noin 10 metriä. Ilmatieteen laitoksen tekemässä ”Piipunkorkeuden mitoitus 1–5 MW energiantuotantoyksiköissä” raportissa on kuvaaja lähiesteen korkeuden vaikutuksesta piipun lisäkorkeuteen. Kuvaaja on lähiesteen korkeuksille 10–30 metriä. Nostotornin korkeuden aiheuttamaa lisää piipun korkeuteen ei voi suoraan lukea kuvaajasta, mutta sen on arvioitu kuvaajan avulla olevan noin 17 metriä. (21, s. 16.) Piipun korkeudeksi saatiin 22 metriä.

## 7 KAUKOLÄMPÖVERKOSTO

Kaukolämpöverkoston mitoituksessa tarkoituksena oli selvittää riittääkö nykyinen kaukolämpöverkosto tehontarpeen noustessa. Lisäksi työssä tutkittiin kaukolämpöpumppujen riittävyttä. Kaukolämpöverkoston riittävyttä tarkasteltiin eri tehontarpeilla, sekä tarvittavat uudet kaukolämpöputket mitoitettiin. Lisäksi verkoston toimivuuden varmistamisessa tarvittiin painehäviölaskentaa.

### 7.1 Kaukolämpöverkoston mitoitus

Kaukolämpöverkoston mitoituksessa merkittäviä muuttujia ovat siirrettävä teho sekä kaukolämpöveden jäähtymä eli meno- ja paluuveden välinen lämpötilaero. Mitoituksessa täytyy huomioida myös lämpimän käyttöveden tehontarpeen vaihtelu. Tarvittavan tehon siirtämiseen vaadittavan vesivirran määrään vaikuttaa huomattavasti kaukolämpöveden jäähtymä. Uudelle nostotornille ja korjaamolle mitoitettiin uudet kaukolämpölinjat. Kaukolämpöverkoston putkikoon mitoittaminen lähti liikkeelle kaavasta 14. (8, s. 52.)

$$\dot{Q} = \rho * q_v * c_p * \Delta t$$

KAAVA 14

$\dot{Q}$  = kaukolämpöteho (kW)

$\rho$  = kaukolämpöveden tiheys (980 kg/m<sup>3</sup>)

$q_v$  = kaukolämpöveden virtaama (dm<sup>3</sup>/s)

$c_p$  = kaukolämpöveden ominaislämpökapasiteetti (4,2 kJ/kg K)

$\Delta t$  = kaukolämpöveden meno- ja paluuveden lämpötilaero (K)

Kaukolämpöveden virtaama laskettiin kaavalla 15. Kaukolämpöveden tiheys 980 kg/m<sup>3</sup> on veden tiheys lämpötilassa 65 °C. Kaukolämpöveden meno- ja paluuveden välisinä eroina on käytetty arvoja 30 °C, 40 °C ja 50 °C vertailun vuoksi.

$$q_v = \frac{\dot{Q}}{\rho * c_p * \Delta t}$$

KAAVA 15

Kun virtaama oli selvillä, putken sisähalkaisija laskettiin kaavalla 16. Mitoituksessa kaukolämpöveden virtausnopeutena käytettiin arvoa 1 m/s.



$$d_s = \sqrt{\frac{4 \cdot q_v}{\pi \cdot v_{mitt}}}$$

KAAVA 16

$d_s$  = laskennallinen putken sisähalkaisija (m)

$q_v$  = kaukolämpöveden virtaama (m<sup>3</sup>/s)

$v_{mitt}$  = mitoituksessa käytettävä kaukolämpöveden virtausnopeus (m/s)

Nostotornin ja korjaamon kaukolämpölinjojen lasketut virtaamat ja putken sisähalkaisijat eri lämpötilaeroilla on esitetty taulukossa 6. Nostotornin kaukolämpölinjan mitoituksessa käytettiin lämpötilaeroja 40 °C ja 50 °C. Korjaamon kaukolämpölinjan mitoituksessa täytyi huomioida talven ja kesän eri lämpötilaerot lämmitykselle sekä lämpimälle käyttövedelle. Talvella lämmityksen lämpötilaerona käytettiin arvoa 70 °C ja lämpimän käyttöveden lämpötilaerona arvoa 90 °C. Talven lämmityksen lämpötilaero tulee lämpötilojen 115 °C ja 45 °C erotuksesta. Talven lämpimän käyttöveden lämpötilaero tulee lämpötilojen 115 °C ja 25 °C erotuksesta. Lämmityksen ja lämpimän käyttöveden vaatimat virtaamat laskettiin yhteen. Virtaama kesän ajalle laskettiin lämpimän käyttöveden lämpötilaerolla 55 °C, joka tulee lämpötilojen 80 °C ja 25 °C erotuksesta. Kesän tehontarpeena käytettiin lämpimän käyttöveden siirtimen mitoitustehoa, joka on 99 kW.

TAULUKKO 6. Kaukolämpölinja uudelle nostotornille ja korjaamolle

Linja nostotornille (tehontarve 2 MW)			
Jäähdytys	Virtaama	Laskettu putken sisähalkaisija / valittu putki	Virtausnopeus (m/s)
$\Delta T$ 40 °C	11,9 l/s	123 mm / DN125	0,9 m/s
$\Delta T$ 50 °C	9,5 l/s	110 mm / DN125	0,7 m/s
$\Delta T$ 50 °C	9,5 l/s	110 mm / DN100	1,1 m/s
Linja korjaamolle (tehontarve 0,6 MW)			
Jäähdytys	Virtaama	Laskettu putken sisähalkaisija / valittu putki	Virtausnopeus (m/s)
Talvi: lämmitys $\Delta T$ = 70 °C ja lämminkäyttövesi $\Delta T$ = 90 °C	2,3 l/s	55 mm / DN65	0,6 m/s
Talvi: lämmitys $\Delta T$ = 70 °C ja lämminkäyttövesi $\Delta T$ = 90 °C	2,3 l/s	55 mm / DN50	1,0 m/s
Kesä: lämminkäyttövesi = $\Delta T$ 55 °C	0,4 l/s	24 mm / DN25	0,7 m/s

Nostotornille menevän kaukolämpölinjan mitoituksessa lämpötilaerona käytetään arvoa 50 °C. Taulukon 6 mukaan nostotornin kaukolämpöputken riittävä koko on DN125, jolloin putken sisähalkaisija on 139,7 mm ja seinämän paksuus 3,6 mm. Uudelle korjaamolle menevän kaukolämpölinjan riittävä koko on DN65, jolloin putken sisähalkaisija on 76,1 mm ja seinämän paksuus 2,9 mm. Kun nostotornin ja korjaamon

putkien sisähalkaisijat tiedettiin, voitiin laskea todellinen kaukolämpöveden virtausnopeus kaavalla 17.

$$v = \frac{q_v \cdot 4}{\pi \cdot d_s^2}$$

KAAVA 17

$v$  = kaukolämpöveden virtausnopeus (m/s)

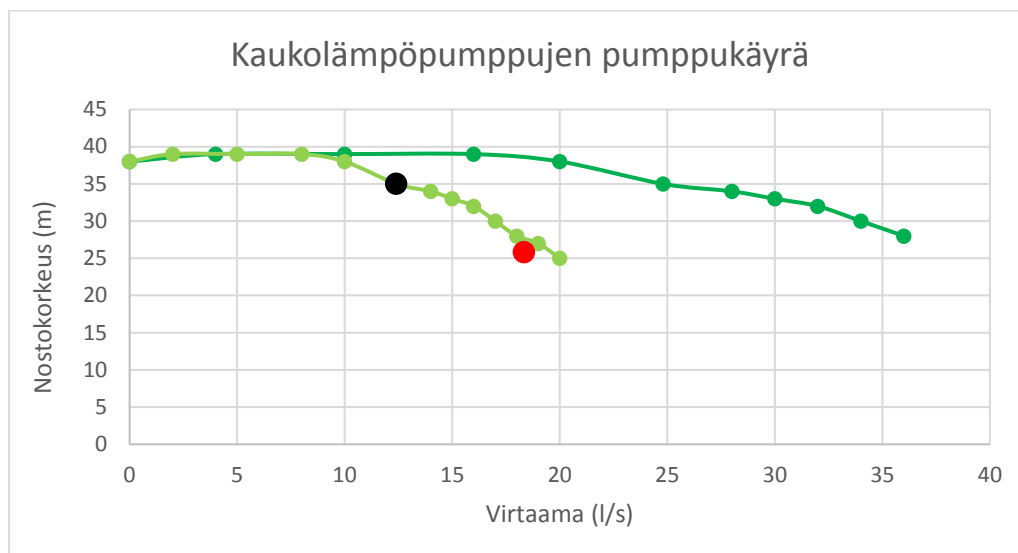
$q_v$  = kaukolämpöveden virtaama (m<sup>3</sup>/s)

$d_s$  = laskennallinen putken sisähalkaisija (m)

Nostotornin putkikoolla DN125 kaukolämpöveden todellinen virtausnopeus on 0,7 m/s lämpötilaerolla 50 °C. Virtausnopeus voi olla kuitenkin suurempi, ettei putki ole liian väljä. Putkikoolla DN100 virtausnopeus on 1,08 m/s lämpötilaerolla 50 °C. Tämän perusteella nostotornin kaukolämpölinjan riittävä putkikoko on DN100, jolloin putken sisähalkaisija on 114 mm ja seinämän paksuus 3,6 mm. Korjaamon putkikoolla DN65 todellinen virtausnopeus on 0,6 m/s. Putkikoolla DN50 virtausnopeus nousee arvoon 1,0 m/s. Pienempi putkikoko DN50 on näin sopivampi. Putkikoon DN50 sisähalkaisija on 60,3 mm ja seinämän paksuus 2,9 mm.

## 7.2 Putkiston ominaiskäyrä

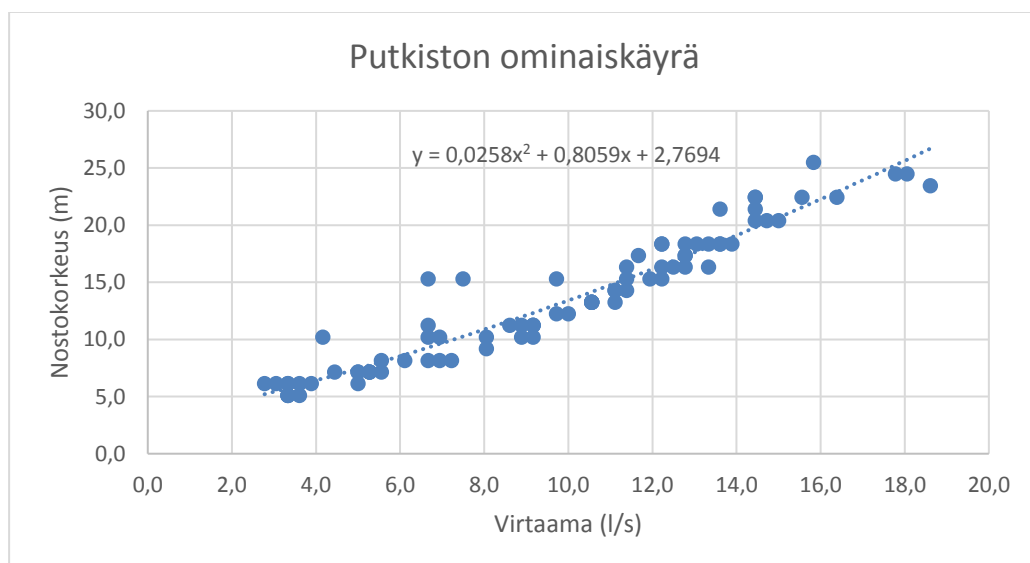
Kemin kaivoksella on kaksi samanlaista Wilon kaukolämpöpumppua kytkettynä rinnan. Yhden pumpun nostokorkeus on 35 metriä ja virtaus 12,4 l/s (25). Rinnan kytkettynä pumppujen nostokorkeus pysyy samana, mutta virtaama kaksinkertaistuu, jolloin se on 24,8 l/s. Kuvassa 10 on pumppukäyrät vihreällä. Vaaleanvihreä käyrä on yhden pumpun ja tummanvihreä käyrä kahden rinnan olevan pumppujen pumppukäyrä. Kuvaajassa musta piste on pumppujen mitoituksessa käytetty toimintapiste, jossa nostokorkeus on 35 m ja virtaama 12,4 l/s.



KUVA 10. Kaukolämpöpumppujen pumppukäyrä

Lisäksi kuvassa 10 näkyy punaisella pisteellä nykyinen huipputehon aikainen toimintapiste. Datan mukaan huipputehon ollessa 2,8 MW nostokorkeus on 25,8 metriä ja virtaama 18,3 l/s.

Putkistolle saatiin ominaiskäyrä vuoden 2016 datan mukaan. Datasta poimittiin kaukolämpöveden virtaama sekä meno- ja paluupaine. Meno- ja paluupaineen erotuksesta saatiin paine-ero eli pumpun nostokorkeus kaukolämpöverkostossa. Kuvassa 11 on putkiston ominaiskäyrä.



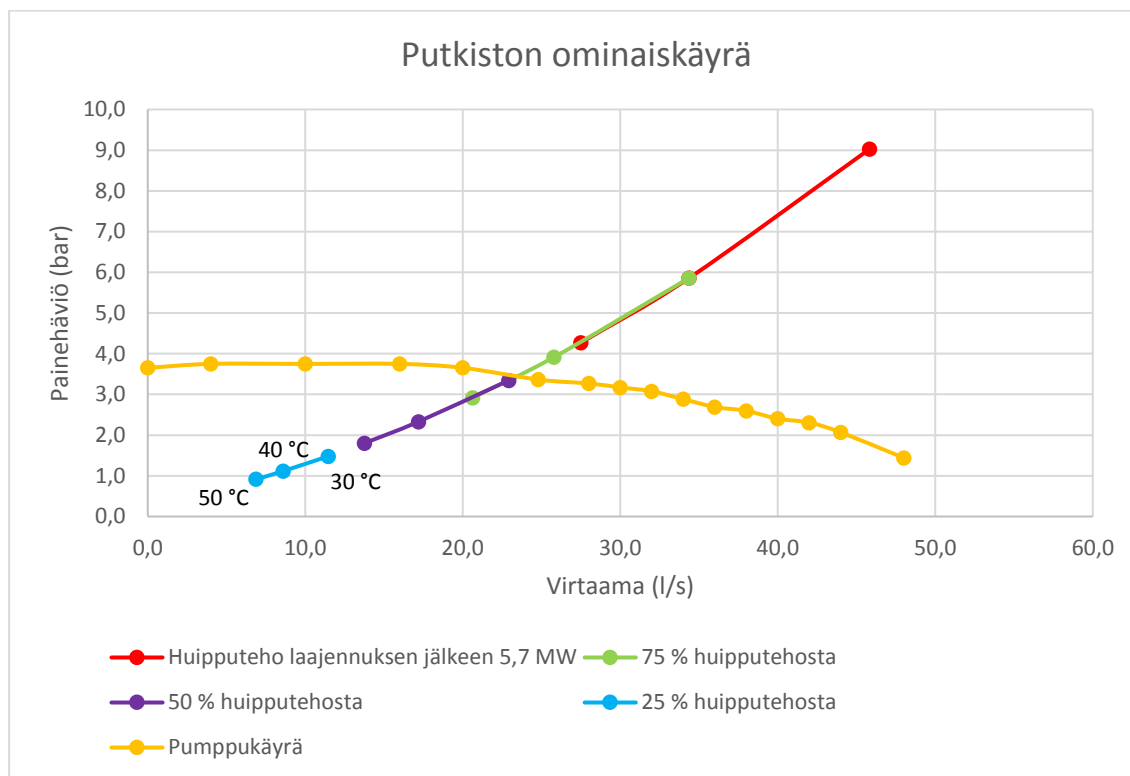
KUVA 11. Putkiston ominaiskäyrä

Pisteiden perusteella saadulla polynomisella kaavalla  $y = 0,0258x^2 + 0,8059x + 2,7694$  on laskettu painehäviöt uudelle huipputeholle. Virtaama laskettiin tehosta kaavalla 15. Kaukolämpöveden meno- ja paluuveden lämpötilaero vaikuttaa virtaaman määrään, joten virtaamia eri tehoille on laskettu eri lämpötilaeroilla. Virtaaman muuttuessa myös painehäviöt muuttuvat. Kuvassa 12 on taulukoituna virtaamat ja painehäviöt eri tehoilla ja eri lämpötilaeroilla.

				$\Delta T\ 30\ ^\circ C$			$\Delta T\ 40\ ^\circ C$			$\Delta T\ 50\ ^\circ C$		
				qv (l/s)	$\Delta p$ (bar)	h (m)	qv (l/s)	$\Delta p$ (bar)	h (m)	qv (l/s)	$\Delta p$ (bar)	h (m)
Huipputeho nyt			2800	22,7	3,3	34,3	17,0	2,3	23,9	13,6	1,8	18,5
Huipputeho laajennuksen jälkeen			5660	45,8	9,0	93,9	34,4	5,9	61,0	27,5	4,3	44,4
75 % huipputehosta			4245	34,4	5,9	61,0	25,8	3,9	40,7	20,6	2,9	30,4
50 % huipputehosta			2830	22,9	3,3	34,8	17,2	2,3	24,2	13,8	1,8	18,7
25 % huipputehosta			1415	11,5	1,5	15,4	8,6	1,1	11,6	6,9	0,9	9,5

*KUVA 12. Virtaamat ja painehäviöt eri tehoilla*

Laajennuksen jälkeen huipputehon maksimivirtaama on 46 l/s ja painehäviöt 9,0 bar lämpötilaeron ollessa 30 °C. Menopaineeseen tulee lisätä pumpun vaatima imupaine, joka on 2 bar. Menopaineeksi saadaan 11 bar. Lämpötilaeron ollessa 50 °C tilavuusvirta on enää 28 l/s ja painehäviöt 4,3 baaria. Painehäviöt tippuvat puolella lämpötilaeron noustessa 30 °C:stä 50 °C:een. Pienemmillä tehoilla lämpötilaeron vaikutus hieman vähenee. Kuvassa 13 on kuvaaja kuvan 12 tehojen virtaamista ja painehäviöistä eri lämpötilaeroilla.



KUVA 13. Lämpötilaerojen vaikutus painehäviöihin ja virtaamaan

Jokaisen tehon käyrässä on kolme eri pistettä. Pisteet kuvastavat eri lämpötilaeroja, jotka ovat 30 °C, 40 °C ja 50 °C. Lisäksi kuvassa 13 keltaisella näkyy nykyisten rinnan kytkettyjen kaukolämpöpumppujen pumppukäyrä. Nykyiset kaukolämpöpumput yhdessä riittävät laajennuksen jälkeen tehon ollessa 25 % ja 50 % huipputehosta. Pumput riittävät nostamaan myös 75 % huipputehosta eli 4,2 MW, kun lämpötilaero meno- ja paluuveden välillä pysyy 50 °C:ssa.

Lisäksi datasta tarkasteltiin kaukolämpöveden meno- ja paluulämpötiloja, joista laskettiin lämpötilaero. Maksimi lämpötilaero datan mukaan on ollut 42,7 °C ja minimi lämpötilaero on ollut 10,2 °C. Lämpötilaerot ovat pienimmät kesällä, kun tehot ovat pienet.

### 7.3 Kaukolämpöverkoston siirtokyvyn tarkistus

Tässä työssä Kemin kaivoksen kaukolämpöverkoston painehäviöt myös laskettiin jokaiselle putkipituudelle. Lisäksi tarkistettiin lämpötehontarpeen noustessa putkikokojen riittävyys. Kaukolämpöverkoston jokaiselle putkipituudelle jaoteltiin putken siirrettävä teho. Tehontarpeen lähteenä käytettiin lämmönsiirtimien tehoja, koska dataa eri kohte-

den tehontarpeesta ei ollut. Lämpimän käyttöveden lämmönsiirtimien tehoista otettiin laskuissa huomioon 15 %. Tehosta laskettiin jokaiselle putkipituudelle sen virtaama kaavan 15 mukaisesti. Jokaisen putken sisähalkaisija laskettiin kaavan 16 mukaisesti ja tarkistettiin sen riittävyys. Mitoitusvirtausnopeutena käytettiin arvoa 1 m/s. Jos putken lasketuksi sisähalkaisijaksi saatiin suurempi kuin mitä todellinen sisähalkaisija on, laskettiin olemassa olevalle putkelle sen todellinen virtausnopeus. Näin tarkistettiin, ettei virtausnopeus nouse liian suureksi.

Painehäviölaskennassa huomioon otettiin kaukolämmön runkoputken painehäviöt sekä vaikeimman lämmönsiirrinpiirin painehäviöt. Vaikein lämmönsiirrinpiiri on uudelle nostotornille menevä kaukolämpölinja, sillä se on kauimmaisena lämmöntuotantolaitoksista sekä tehontarve on nostotornilla suuri. Painehäviölaskennassa käytettiin verkoston putkien todellisia sisähalkaisijoita. Kaukolämpöveden todellinen virtausnopeus jokaisessa putkessa laskettiin kaavan 17 mukaisesti. Painehäviölaskenta lähtee liikkeelle Reynoldsin luvun laskemisesta kaavan 18 mukaisesti.

$$Re = \frac{v \cdot d_s}{\nu}$$

KAAVA 18

$Re$  = Reynoldsin luku

$v$  = virtausnopeus (m/s)

$d_s$  = putken sisähalkaisija (m)

$\nu$  = kinemaattinen viskositeetti ( $m^2/s$ )

Kinemaattisena viskositeettinä on käytetty arvoa  $4,42857 \times 10^{-7} m^2/s$ . Kinemaattinen viskositeetti on saatu kaavasta 19.

$$\nu = \frac{\mu}{\rho}$$

KAAVA 19

$\nu$  = kinemaattinen viskositeetti ( $m^2/s$ )

$\mu$  = dynaaminen viskositeetti (0,000434 kg/ms)

$\rho$  = tiheys (980 kg/m<sup>3</sup>)

Dynaaminen viskositeetti 0,000434 kg/ms on veden viskositeetti lämpötilassa 65 °C.

Tiheys 980 kg/m<sup>3</sup> on veden tiheys lämpötilassa 65 °C.

Seuraavaksi selvitettiin putkivastuskerroin Moodyn käyrästä Reynoldsin luvun ja kaavalla 20 saadun luvun avulla. Putken materiaali on mustaa terästä, jonka pinnankarheus on 0,05 mm.

$$n = \frac{\varepsilon}{d_s}$$

KAAVA 20

$n$  = luku Moodyn käyrästä varten

$\varepsilon$  = pinnankarheus (mm)

$d_s$  = putken sisähalkaisija (mm)

Painehäviöt muodostuvat putkiston aiheuttamista kitkavastuksista sekä putkiston ja putkistovarusteiden aiheuttamista kertavastuksista. Kitkahäviöt aiheutuvat fluidin ja putken seinämän välisestä kitkasta. Kitkapainehäviöt laskettiin kaavan 21 mukaisesti.

$$\Delta p_{kitka} = \lambda * \frac{l}{d_s} * \frac{1}{2} * \rho * v^2$$

KAAVA 21

$\Delta p_{kitka}$  = kitkapainehäviöt

$\lambda$  = putkivastuskerroin

$l$  = putkiston pituus (m)

$d_s$  = putken sisähalkaisija (m)

$\rho$  = tiheys (kg/m<sup>3</sup>)

$v$  = virtausnopeus (m/s)

Kertavastukset laskettiin kaavan 22 mukaisesti. Kertahäviöt aiheutuvat yksittäisistä kertavastuksista, joita ovat esimerkiksi putken mutkat, supistukset, laajennukset, pumput ja venttiilit.

$$\Delta p_{kerta} = \zeta * \rho * \frac{1}{2} * v^2$$

KAAVA 22

$\zeta$  = kertavastuskerroin

$\rho$  = tiheys (kg/m<sup>3</sup>)

$v$  = virtausnopeus (m/s)

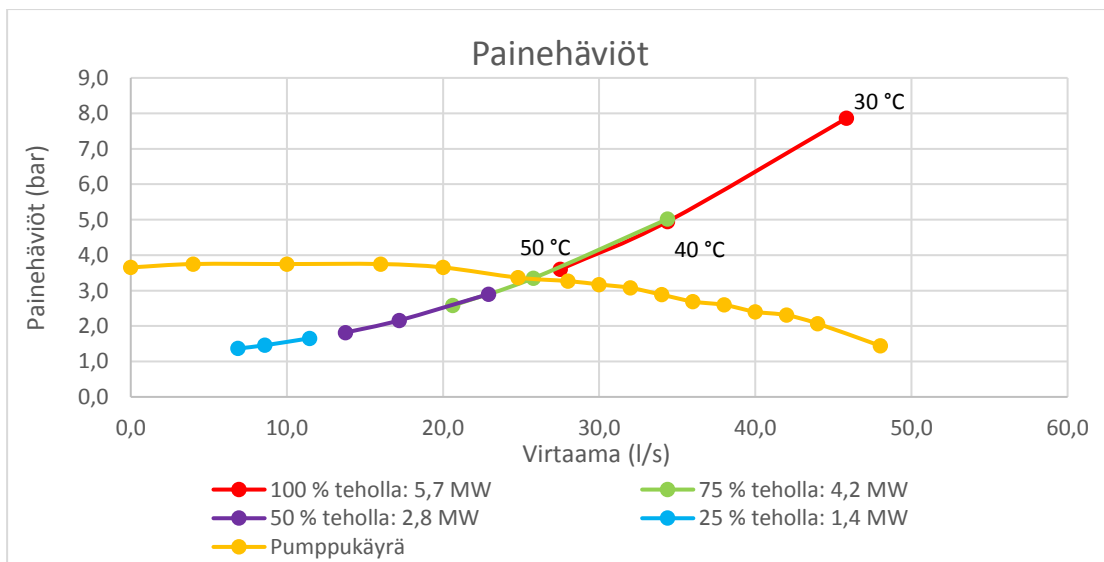
Kokonaispainehäviöt muodostuvat kaavojen 21 ja 22 summasta. Kuvassa 14 on virtaamat ja painehäviölaskujen mukaisesti lasketut putkiston painehäviöt ja nostokorkeudet eri tehoilla. Painehäviöt laskettiin eri lämpötilaeroilla vertailun vuoksi.



		$\Delta T\ 30\ ^\circ C$			$\Delta T\ 40\ ^\circ C$			$\Delta T\ 50\ ^\circ C$		
		qv (l/s)	$\Delta p$ (bar)	h (m)	qv (l/s)	$\Delta p$ (bar)	h (m)	qv (l/s)	$\Delta p$ (bar)	h (m)
100 % teholla	5660,0	45,8	7,9	81,8	34,4	4,9	51,5	27,5	3,6	37,5
75 % teholla	4245,0	34,4	5,0	52,2	25,8	3,4	34,8	20,6	2,6	26,8
50 % teholla	2830,0	22,9	2,9	30,2	17,2	2,2	22,5	13,8	1,8	18,9
25 % teholla	1415,0	11,5	1,7	17,2	8,6	1,5	15,2	6,9	1,4	14,2

KUVA 14. Virtaamat ja painehäviöt eri tehoilla

Painehäviölaskujen mukaan saatuja painehäviöitä verrattiin datan polynomisen kaavan avulla saatuihin painehäviöihin. Kuvien 12 ja 14 tuloksia vertaamalla huomataan painehäviöissä ja nostokorkeuksissa olevan eroja. Yleisesti voidaan sanoa painehäviöiden olevan suuremmat polynomisen kaavan mukaan lasketuilla. Laskemalla painehäviöiksi huipputeholla saatiin 7,9 baaria ja polynomisen kaavan avulla painehäviöiksi saatiin 9 baaria. Menopaineeseen tulee lisätä vielä pumpun vaatiman imupaine 2 bar, jolloin menopaine on laskemalla 10 bar ja polynomisen kaavan mukaan 11 bar. POK-kattilan maksimi käyttöpaineen ollessa 10 bar, täytyy tarkastella verkoston painehäviöiden alenemista. Verkoston painehäviöt nousevat muuten liian suureksi POK-kattilan käyttöpaineelle. Kuvassa 15 on kuvaaja kuvan 14 painehäviöistä eri tehoilla sekä eri jäähdytymillä.

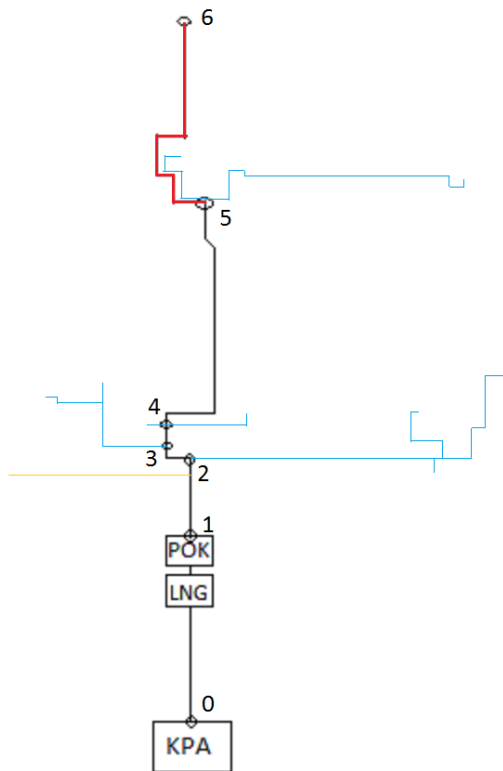


KUVA 15. Painehäviöt eri tehoilla

Kuvan 15 kuvaajasta näkee lämpötilaeron vaikutuksen painehäviöihin. Suurin vaikutus lämpötilaerolla on huipputehon ollessa 5,7 MW. Laajennuksen jälkeisellä huipputeholla

maksimipainehäviöt ovat 7,9 baaria ja virtaama 46 l/s. Tällöin jäähtymä on 30 °C. Jos jäähtymä on 50 °C, painehäviöt ovat enää 3,6 baaria ja virtaama 28 l/s. Lopputuloksena uusien painehäviöiden määrittämisessä päätettiin käyttää polynomisen kaavan mukaan saatuja arvoja, koska datan mukaan saatu kaava kuvaa paremmin putkiston ominaisuuksia.

Painehäviölaskuissa runkoputkisto jaettiin viiteen osaan. Kuvassa 16 on nykyinen kaukolämpöverkosto. Kuvassa mustalla on runkoputki ja sinisellä talojohdot eri lämmönsiirtimille. Kuvassa punaisella on suunniteltu nostotornille menevä linja, ja oranssilla suunniteltu korjaamolle menevä linja. Painehäviöt laskettiin runkoputkesta sekä vaikeimmalle lämmönsiirrinpiirille menevästä putkesta eli putkesta nostotornille.



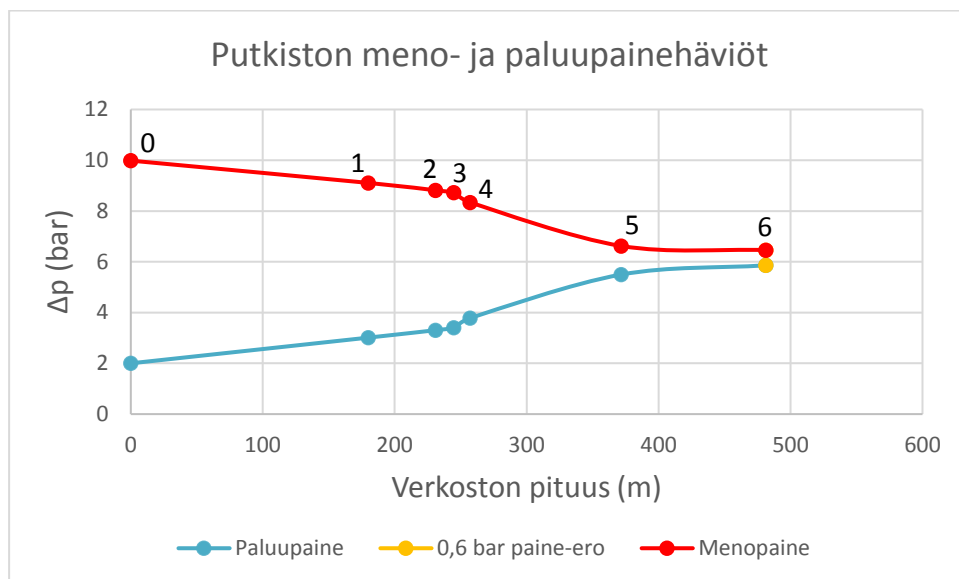
KUVA 16. Kaukolämpöverkosto

Putkiston osassa 5 kaukolämpöputki haarautuu palarikastamolle ja murskeelle. Taulukossa 7 on eritelty painehäviöt eri putkiston osilla. Taulukon arvot laskettiin 30 °C:n lämpötilaerolla.

TAULUKKO 7. Putkisto-osien painehäviöt

Putkisto- osan nu- mero	Putkikoko	Pituus (m)	Painehäviöt (bar)	Virtausnopeus (m/s)
0–1	DN150	180 m	0,9 + KPA ja maakaasu- kattiloiden painehäviöt	2,3
1–2	DN150	51 m	0,3	2,3
2–3	DN150	14m	0,1	2,4
3–4	DN100	12 m	0,4	3,8
4–5	DN100	114 m	1,7	3,6
5–6	DN100	110 m	0,4 + lämmönsiirtimen pai- nehäviöt	1,8

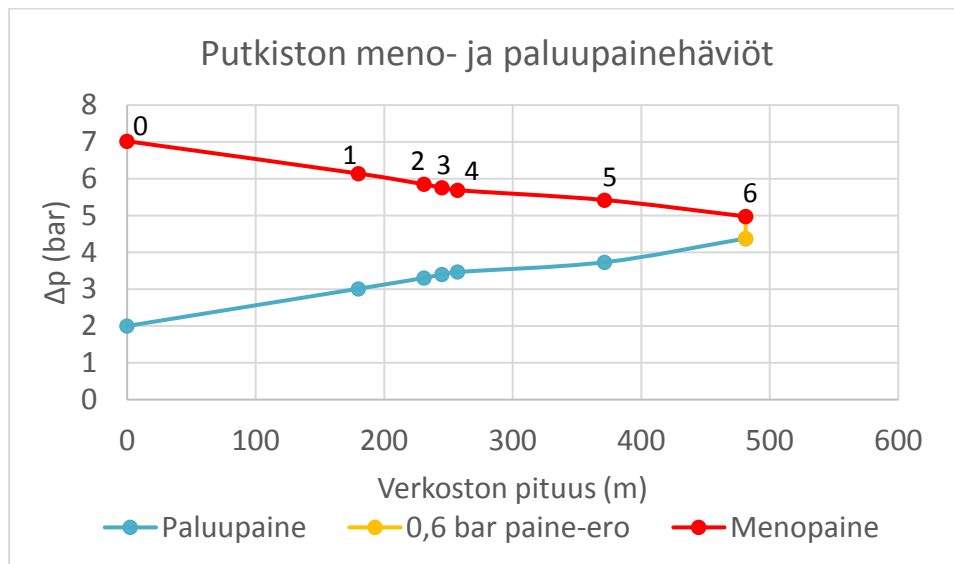
Kattilan vesipuolen painehäviöinä on käytetty arvoa 0,045 bar. Lämmönsiirtimen painehäviönä on käytetty arvoa 0,2 bar. Lisäksi pisteessä kuusi painehäviöihin lisättiin 0,6 bar:n tarvittava paine-ero kauimmaisella lämmönsiirtimellä. Putkiston osien painehäviöt kerrottiin kahdella, jolloin otettiin huomioon myös paluuputken painehäviöt. Lisäksi putkiston menopaineessa täytyy huomioida kaukolämpöpumpun imupuolen vaatima paine, joka on vähintään 2 bar. Kuvassa 17 on kuvaaja putkiston meno- ja paluupuolen painehäviöistä. Lämpötilaerona laskuissa käytettiin arvoa 30 °C.



KUVA 17. Meno- ja paluuputkiston painehäviöt

Kuvan 17 mukaan menopaine on 10 bar. Putkiosuus 0–1 on KPA-laitokselta lähtevän kaukolämpöputken painehäviöt. Osuudella 0–1 on jyrkempi painehäviöiden nousu, sillä KPA-laitokselta tuleva putki on pituudeltaan pitkä. Verkoston osuuden 0–1 putkikoko on DN150 eli putken sisähalkaisija on 168,3 mm ja seinämän paksuus 4,0 mm. Uuden tehontarpeen eli 5,7 MW:n virtaama on 34,4 l/s 40 °C:n lämpötilaerolla. Kaavan 16 mukaisesti saatiin putken sisähalkaisijaksi 209 mm, jolloin putken koon tulisi olla DN200. Mittoitusvirtausnopeutena käytettiin arvoa 1 m/s. Kaukolämpöveden todelliseksi virtausnopeudeksi vanhalla putkikoolla saatiin 1,7 m/s tehontarpeen noustessa. Todellinen virtausnopeus ei kuitenkaan ole liian korkea, joten vanha putkikoko DN150 riittää tehontarpeen noustessa.

Verkoston osuuksilla 3–5 näkyy kuvassa 17 jyrkempi painehäviöiden nousu. Tämä johtuu putken koon DN100 ollessa liian pieni, mikä aiheuttaa virtausnopeuden nousun arvoihin 3,6–3,8 m/s. Tässä kohtaa verkostoa täytyy tarkistella suuremman putkikoon investointia. Kuvassa 18 on kuvaaja putkiston meno- ja paluupainehäviöistä tilanteessa, jossa kyseinen liian pieni putkikoko DN100 on uusittu kokoon DN150.



*KUVA 18. Meno- ja paluuputkiston painehäviöt putkistousinnan jälkeen*

Putkiston uusimisen jälkeen huipputeholla 5,7 MW menopaine on 7 bar eli menopaine laski 3 bar uusimisen myötä. Uusittavan putken pituus on 127 m.

## 8 YHTEENVETO

Kemin kaivoksen laajentumisen myötä lämpötehontarve kaivoksella kasvaa. Kaivoksen nykyiset lämpökattilat eivät riitä lämmöntuotantoon. Työn tavoitteena oli määrittää maakaasua polttoaineenaan käyttävän lämpökattilan teho ja pyytää alustavia budjettitarjouksia toimeksiantajan varsinaisia neuvotteluja varten. Lisäksi työssä laskettiin ja analysoitiin nykyisen kaukolämpöverkoston riittävyttä tehontarpeen noustessa.

Budjettitarjousten ja tehontarpeen mukaan esitetään investoinniksi 4 MW:n lämpökattilaa. Suuremman kattilan investoinnilla otetaan huomioon pieni vara, jos tehontarve edelleen nousee tulevaisuudessa. Uuden maakaasukattilan investoinnin jälkeen kaukolämpöä tuotetaan kolmella eri kattilalla. Kattilat ovat 2 MW:n KPA-kattila, 4 MW:n maakaasukattila sekä 1,5 MW:n maakaasukattila, joka aikaisemmin käytti polttoaineenaan kevyttä öljyä. Öljykattiloiden polttimet vaihdetaan maakaasulle sopiviksi vuoden 2019 aikana. Lämpökattiloiden yhteisteho on 7,5 MW. KPA-kattila ja 4 MW:n maakaasukattila yhdessä riittävät lämmöntuotantoon talven huipputehojen aikaan. Maakaasukattilat tuottavat yhdessä 5,5 MW lämpötehoa. Lisäksi 0,5 MW:n höyrylämmönsiirrin auttaa lämmöntuotannossa. Näin kattilat riittävät lämmöntuotantoon, vaikka KPA-kattila olisi pois käytöstä.

Kaukolämpölinjat runkolinjasta uudelle nostotornille sekä korjaamolle mitoitettiin mitoitusturvatausnopeudella 1 m/s. Nostotornille menevän kaukolämpöputken riittävä koko on DN100 ja korjaamolle DN50.

Verkoston painehäviöt kasvavat tehon noustessa, joten työssä tutkittiin myös painehäviöitä. Putkiston painehäviöt määritettiin laskemalla sekä painehäviöiden datan perusteella saadun polynomisen kaavan mukaan. Lopputuloksena käytetään polynomisen kaavan mukaan saatuja painehäviöitä, sillä datan kuvaaja kuvaa parhaiten putkiston ominaisuuksia. Laajennuksen jälkeisen huipputehon 5,7 MW:n painehäviöt nykyisellä putkistolla ovat 9 baaria ja nostokorkeutena 94 m jäähtymän ollessa 30 °C. Menopaineeseen lisätään pumpun vaatima imupaine, joka on 2 bar. Näin menopaineeksi saadaan 11 bar. Putkiston käyttöpaineen ollessa 16 baaria painehäviöt tehontarpeen noustessa eivät nouse liian korkeiksi putkistolle. 1,5 MW:n POK-kattilan eli tässä vaiheessa

maakaasukattilan maksimikäyttöpaineen ollessa 10 bar täytyy tarkastella putkiston painehäviöiden alentamista, sillä muuten menopaine on liian suuri kattilan maksimikäyttöpaineelle. Jäähtymän ollessa 40 °C painehäviöt ovat 6 bar, jolloin menopaine on 8 bar. Suuremmalla jäähtymällä eli lämpötilaerolla painehäviöt ovat pienemmät.

Putkiston mitoituksessa tuli ilmi joidenkin putkiosuuksien olevan kooltaan liian pieniä. Pieneksi käyvillä putkiosuuksilla virtausnopeudet kasvavat, mikä aiheuttaa painehäviöiden nousun. Suurimmat painehäviöt syntyvät putkiosuuksilla 3–5, joiden putkikoko on DN100. Kyseisillä putkiosuuksilla virtausnopeudet nousevat arvoihin 3,6–3,8 m/s. Näillä putkiosuuksilla täytyy tarkastella putkikoon suurentamista kokoon DN150. Uusimisen myötä virtausnopeudet putoavat arvoihin 1,6–1,7 m/s, ja painehäviöt putoavat 3 bar. Putkiston uusimisen myötä pumppauskustannuksissa säästettäisiin. Kaukolämpöpumpujen teho ei meinaa riittää nykyisilläkään huipputehoilla, joten ne täytyy uusia tehontarpeen noustessa.

## LÄHTEET

1. Tornion Voima Oy on merkittävä Tornion alueen energiantuottaja. 2018. Tornion Voima Oy. Saatavissa: <https://www.tovo.fi/>. Hakupäivä 5.1.2018.
2. EPV Energia tuottaa ja hankkii energiaa omakustannushintaan. 2018. EPV Energia Oy. Saatavissa: <https://www.epv.fi/yritys>. Hakupäivä 30.1.2018.
3. Uusi tekniikka avaa uusia markkinoita. 2016. AGA. Saatavissa: [http://www.aga.fi/internet.lg.lg.fin/fi/images/AGA%20LNG%20Brochure%20FI634\\_169000.pdf?v=1.0](http://www.aga.fi/internet.lg.lg.fin/fi/images/AGA%20LNG%20Brochure%20FI634_169000.pdf?v=1.0). Hakupäivä 12.1.2018.
4. Aho, Juha – Hietamäki, Eljas – Hyytiä, Hille - Jalovaara, Jukka 2003. Paras käytettävissä oleva tekniikka (BAT) 5-50 MW:n polttolaitoksissa Suomessa. Helsinki: Suomen ympäristökeskus. Saatavissa: [https://helda.helsinki.fi/bitstream/handle/10138/40560/SY\\_649.pdf?sequence=1](https://helda.helsinki.fi/bitstream/handle/10138/40560/SY_649.pdf?sequence=1). Hakupäivä 12.1.2018.
5. Maakaasu käsikirja. 2014. Suomen kaasuyhdistys ry. Helsinki. Saatavissa: [http://www.kaasuyhdistys.fi/sites/default/files/kuvat/kirja/MaakaasuKasikirja\\_helmikuu2014.pdf](http://www.kaasuyhdistys.fi/sites/default/files/kuvat/kirja/MaakaasuKasikirja_helmikuu2014.pdf). Hakupäivä 12.1.2018.
6. Öljy-, kaasu- ja yhdistelmäpolttimet. 2016. Oilon. Saatavissa: [https://filebrowser.oilon.com/www/uploadedfiles/Oilon/Materials/Oilon\\_3\\_FI.pdf](https://filebrowser.oilon.com/www/uploadedfiles/Oilon/Materials/Oilon_3_FI.pdf). Hakupäivä 15.1.2018.
7. Maakaasun käyttö Suomessa. 2017. Gasum. Saatavissa: <https://www.gasum.com/kaasusta/maakaasu/maakaasu/>. Hakupäivä 13.3.2018.
8. Mäkelä, Veli-Matti – Tuunanen, Jarmo 2015. Suomalainen kaukolämmitys. C: Oppimateriaalia – Study material 16. Mikkeli: Mikkelin ammattikorkeakoulu. Saatavissa: <http://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/97138/URNISBN9789515885074.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Hakupäivä 26.1.2018.



9. Tolonen, Katariina 2018. Re: Kaivoksen kulutustaulukko. Sähköpostiviesti. Vastaanottaja: Henni Jukkola. 31.1.2018.
10. Rautio, Niko 2017. FW: Uuden korjaamon lämmöntarve. Sähköpostiviesti. Vastaanottaja: Henni Jukkola. 22.12.2017.
11. Rautio, Niko 2018. FYI: Kaivoksen korjaamon tehontarpeet. Sähköpostiviesti. Vastaanottaja: Henni Jukkola. 4.4.2018.
12. D3 (2012). 2011. Rakennusten energiatehokkuus. Määräykset ja ohjeet 2012. D3 Suomen rakentamismääräyskokoelma. Helsinki: Ympäristöministeriö, Rakennetun ympäristön osasto. Saatavissa: [https://www.finlex.fi/data/normit/37188/D3-2012\\_Suomi.pdf](https://www.finlex.fi/data/normit/37188/D3-2012_Suomi.pdf) . Hakupäivä 8.1.2018.
13. Energiatehokkuus. Rakennuksen energiankulutuksen ja lämmitystehontarpeen laskenta. 2018. Suomen rakentamismääräyskokoelma. Helsinki: Ympäristöministeriö. Saatavissa: <http://www.ym.fi/download/noname/%7B4332AA81-75E1-4CA0-B208-B0ACB60A267F%7D/133692>. Hakupäivä 5.1.2018.
14. D2 Hanke. 2017. Opas ilmanvaihdon mitoitukseen muissa kuin asuinrakennuksissa. Loppuraportti ympäristöministeriön hankkeista. Finvac ry. Helsinki. Saatavissa: <http://www.ym.fi/download/noname/%7B59DC42F9-7C8A-4CBE-817E-1E2DBB67E02E%7D/133706>. Hakupäivä 8.1.2018.
15. D1 (2007). 2007. Kiinteistöjen vesi- ja viemärlaitteistot. Määräykset ja ohjeet 2007. D1 Suomen rakentamismääräyskokoelma. Helsinki: Ympäristöministeriö. Saatavissa: [https://www.finlex.fi/data/normit/28208/D1\\_2007.pdf](https://www.finlex.fi/data/normit/28208/D1_2007.pdf). Hakupäivä 8.1.2018.
16. Suositus K15/1998. 1998. Tilausteho ja -vesivirta. Määritys ja tarkistaminen. Suomen kaukolämpö ry. Saatavissa: <http://docplayer.fi/3804437-Tilausteho-ja-vesivirta-maaritys-ja-tarkistaminen.html>. Hakupäivä 19.1.2018.
17. Kakko, Markku 2012. Lämminvesikattilan lämpötekniinen suunnittelu. Opinnäytetyö. Kymenlaakson ammattikorkeakoulu: Kone- ja tuotantotekniikka. Saatavissa: [https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/43838/Kakko\\_Markku.pdf?sequence=1](https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/43838/Kakko_Markku.pdf?sequence=1). Hakupäivä 26.1.2018.

18. Huhtinen, Markku – Kettunen, Arto – Nurminen, Pasi – Pakkanen, Heikki 2000. Höyrykattilatekniikka. Helsinki: Edita.
19. Nyman, Samuli 2016. Tulitorvi-tuliputkikattilan suunnitteluprosessi. opinnäytetyö. Oulu: Oulun ammattikorkeakoulu, energiatekniikka. Saatavissa: [https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/109467/Nyman\\_Samuli.pdf?sequence=1](https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/109467/Nyman_Samuli.pdf?sequence=1). Hakupäivä 26.1.2018.
20. Unicon WF. 2018. Kpa-Unicon. Saatavissa: [http://www.kpaunicon.com/fi/unicon\\_wf](http://www.kpaunicon.com/fi/unicon_wf). Hakupäivä 29.1.2018.
21. Latikka, Jenni – Laukkanen, Emmi – Salmi, Jatta 2018. Piipunkorkeuden mitoitus 1–5 MW energiantuotantoyksiköissä. Ilmanlaatuselvitys. Helsinki: 2018. Saatavissa: [https://helda.helsinki.fi/bitstream/handle/10138/230909/Piipunkorkeuden%20mitoitus%201-5%20MW%20energiantuotantoyksik%C3%B6iss%C3%A4\\_2017.pdf?sequence=1](https://helda.helsinki.fi/bitstream/handle/10138/230909/Piipunkorkeuden%20mitoitus%201-5%20MW%20energiantuotantoyksik%C3%B6iss%C3%A4_2017.pdf?sequence=1). Hakupäivä 26.3.2018.
22. Kemin kaivoksen nostotorni harjassa. 2002. Yle Uutisten artikkeliarkisto. Saatavissa: <https://yle.fi/uutiset/3-5122397>. Hakupäivä 27.3.2018.
23. Budjettitarjous. 6.2.2018. Vastaanottaja Tornion Voima Oy.
24. Öljy-, kaasu- ja yhdistelmäpolttimet. 2016. Oilon. Saatavissa: [https://filebrowser.oilon.com/www/uploadedfiles/Oilon/Materials/Oilon\\_4B\\_Stream\\_Fl.pdf](https://filebrowser.oilon.com/www/uploadedfiles/Oilon/Materials/Oilon_4B_Stream_Fl.pdf). Hakupäivä 15.1.2018.
25. Kaukolämpöpumppu dokumentti 2012. KL-pumput IL 50/170–7,5/2. WILO Finland Oy.